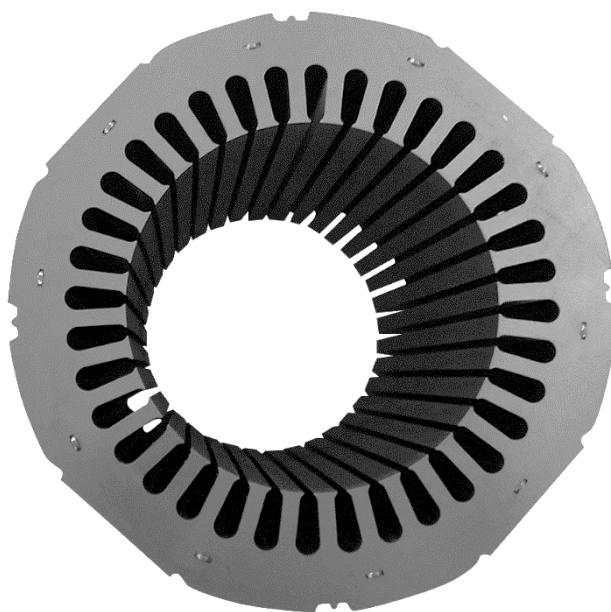


Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте.
Методы составления схем обмоток асинхронных
электродвигателей.



В настоящем документе представлена только часть указанного издания, касающаяся
практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте
и составление схем обмоток.

Рубо Леонид Григорьевич

"Пересчет и ремонт асинхронных двигателей мощностью до 100 квт." 1961 г.

Rev. 09 15 September 2025

Глава первая Расчеты обмоток

1–1. общие сведения.

При вращении катушки в магнитном поле наводимая в ней электродвижущая сила (э. д. с.), а, следовательно, и ток непрерывно меняются как по величине, так и по направлению. Время, в течение которого изменяются э. д. с. или ток, после чего эти изменения начинают повторяться, называется периодом. Число периодов или изменений в одну секунду называется частотой, обозначается буквой f и измеряется в герцах ($гц$).

Ввиду того, что переменный ток, проходя по проводнику, непрерывно меняет величину и направление, соответственно и магнитное поле вокруг проводника непрерывно изменяется. При увеличении тока магнитное поле увеличивается, а силовые магнитные линии увеличивающегося поля пересекают проводник и наводят в нем так называемую э. д. с. самоиндукции. При уменьшении тока магнитное поле уменьшается и проводник снова пересекается магнитными силовыми линиями уменьшающегося поля, поэтому и в проводнике также возникает э. д. с. самоиндукции. Ток и э. д. с. самоиндукции не совпадают по фазе, то есть э. д. с. самоиндукции достигает своего наибольшего значения не одновременно с наибольшим значением тока, а несколько позже, спустя четверть периода.

Если через катушку пропустить постоянный по величине и направлению ток, то явления самоиндукции наблюдаться не будут, так как магнитное поле катушки останется постоянным. В этом случае при прохождении тока напряжение сети затрачивается на преодоление активного сопротивления обмотки катушки, т. е. происходит потеря напряжения на преодоление сопротивления обмотки катушки постоянному току.

При прохождении через эту же катушку переменного тока в ней возникает э. д. с. самоиндукции, действующая против напряжения сети. Поэтому для прохождения через катушку переменного тока той же величины, что и постоянного, необходимо приложить большее напряжение, чтобы преодолеть активное сопротивление катушки и действие э. д. с. самоиндукции, ибо самоиндукция как бы увеличивает сопротивление катушки прохождению переменного тока. К активному сопротивлению R зависящему от удельного сопротивления проводника, прибавляется сопротивление X вызванное э. д. с. самоиндукции, так называемое индуктивное сопротивление. Оба сопротивления – активное и индуктивное – при переменном токе, складываясь геометрически, дают общее сопротивление, называемое полным и определяемое по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ Ом. (1 – 1)}$$

Ток в цепи переменного тока равен приложенному напряжению, деленному на полное сопротивление цепи:

$$I = \frac{U}{Z}$$

Напряжение в цепи переменного тока отстает или опережает ток на некоторый угол, обозначаемый греческой буквой φ (фи). Если бы в переменном токе сдвиг между током и напряжением отсутствовал, мощность переменного тока определялась бы по той же формуле, что и для постоянного, т. е. она равнялась бы произведению тока на напряжение:

$$P = U \times I$$

Для определения мощности при сдвиге фаз между током и напряжением необходимо в формулу мощности ввести поправочный коэффициент мощности $\cos\varphi$ (который всегда меньше единицы):

$$P = U \times I \times \cos \varphi \quad (1 - 2)$$

Трехфазный ток состоит из трех однофазных токов, сдвинутых друг относительно друга на 120° . На статоре электродвигателя трехфазного тока помещаются три обмотки, сдвинутые одна по отношению к другой на 120° , концы которых могут быть соединены звездой или треугольником. При соединении обмоток фаз звездой фазный ток I_Φ , проходящий через обмотку каждой фазы, будет равен линейному току I_L , а напряжение каждой фазы (фазное напряжение) U_Φ будет в 1,73 раза меньше напряжения линии U_L измеренного между двумя линейными проводами (линейное напряжение). При соединении обмоток фаз звездой между фазными и линейными током и напряжением будут следующие соотношения:

$$I_\Phi = I_L; U_\Phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{U_L}{1,73} \quad (1 - 3)$$

При соединении обмоток фаз треугольником линейный ток I_L , проходящий через обмотку, больше фазного I_Φ в 1,73 раза, а фазное напряжение U_Φ равно линейному. Таким образом, при соединении обмоток фаз треугольником между фазными и линейными током и напряжением будут следующие соотношения:

$$U_\Phi = U_L; I_\Phi = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{I_L}{1,73} \quad (1 - 4)$$

Обычно обмотки фаз электродвигателей могут быть соединены либо звездой, либо треугольником. Если обмотки фаз электродвигателя соединены в звезду при напряжении 380 в, то для его включения в сеть напряжением 220 в достаточно фазные обмотки пересоединить в треугольник. В том и другом случаях на каждую фазу приходится одинаковое напряжение 220 в так как при соединении фаз звездой:

$$U_\Phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ в, при соединении треугольником: } U_\Phi = U_L = 220 \text{ в}$$

1-2. Асинхронные электродвигатели.

а) Принцип действия.

Асинхронные электродвигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором являются в настоящее время наиболее распространенными, так как они отличаются простотой конструкции, большой надежностью в эксплуатации, имеют сравнительно высокие к. п. д и коэффициент мощности. Они состоят из двух основных частей: неподвижной части – статора (с обмоткой статора) и вращающейся части – ротора (с обмоткой ротора) Основным типом асинхронного электродвигателя является трехфазный. Если к обмотке статора трехфазной машины подвести трехфазный ток, то в машине образуется магнитный поток, замыкающийся через пакеты стали статора и ротора, который вращается со скоростью:

$$n_c = \frac{60}{p} \times f \quad (1 - 5)$$

n_c – число оборотов вращающегося магнитного поля в минуту (синхронная скорость вращения); f – частота переменного тока, гц (число периодов в секунду); p – число пар полюсов обмотки статора.

В Советском Союзе обычно применяется промышленная частота $f = 50$ гц, поэтому синхронное число оборотов вращающегося поля составит:

$$n_c = \frac{60 \times 50}{p} = \frac{3000}{p}$$

Если в расточку статора вставить ротор с обмоткой, то вращающееся магнитное поле, пересекая проводники обмотки, возбуждает в обмотке ротора э. д. с. В результате взаимодействия проводников ротора под током с вращающимся полем возникает сила, стремящаяся повернуть ротор в направлении вращающегося магнитного поля, и ротор начинает вращаться, создавая момент вращения $M_{вр}$.

Легко видеть, что число оборотов ротора в минуту n не может равняться числу оборотов вращающегося магнитного поля n_c (синхронному) так как в этом случае проводники ротора были бы неподвижны относительно вращающегося поля и исчезли бы э. д. с. и ток в обмотке ротора. Действительное число оборотов асинхронного электродвигателя всегда меньше синхронного числа оборотов вращающегося магнитного поля (поэтому он и называется асинхронным, т. е. не синхронным) из-за скольжения. Величина скольжения асинхронного электродвигателя выражается формулой:

$$S\% = (n_c - n) \times 100$$

в процентах от синхронной скорости. Вращающееся магнитное поле пересекает проводники не только обмотки ротора, но и статора, возбуждая и в них э. д. с. E_1 , а подведенное к обмотке статора напряжение будет:

$$U_1 = E_1 + I_1 \times \sqrt{r_1^2 + X_1^2} \quad (1 - 6)$$

где: U_1 – подведенное к статору напряжение; E_1 – э. д. с. обмотки статора; I_1 – ток статора; r_1 – сопротивление обмотки статора постоянному току; $X_1 = 2 \times \pi \times f \times L_c$ – индуктивное сопротивление обмотки статора.

Величина $I_1 \times \sqrt{r_1^2 + X_1^2}$ представляет собой падение напряжения в обмотке статора. Обычно эта величина невелика, поэтому E_1 незначительно отличается от U_1 и при номинальной нагрузке разница составляет 4 – 6%. Потребляемая трехфазным электродвигателем мощность определяется формулами:

активная мощность:

$$P_2 = \frac{\sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi}{1000} \text{ (кВт)} \quad (1 - 7)$$

реактивная мощность:

$$P_p = \frac{\sqrt{3} \times U \times I \times \sin \varphi}{1000} \text{ (кВАр)} \quad (1 - 8)$$

полная мощность:

$$P_s = \frac{\sqrt{3} \times U \times I}{1000} \text{ (кВА)} \quad (1 - 9)$$

где: U – линейное напряжение питающей сети, в; I – ток в одной фазе питающей сети, а; φ – угол сдвига фаз. Мощность, отдаваемая электродвигателем P_n (полезная мощность на валу), определяется из формулы:

$$P_2 = \frac{M \times n}{975} \text{ (кВт)}$$

где: M – момент на валу электродвигателя, кг $\times$ м, n – действительное число оборотов ротора в минуту.

Отношение полезной мощности электродвигателя P_2 к потребляемой P называется коэффициентом полезного действия η (к. п. д.). Для трехфазного электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P} = \frac{1000}{975 \times \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi} \approx 0,6 \times \frac{M \times n}{U \times I \times \cos \varphi} \quad (\text{кВт}) \quad (1 - 10)$$

б) Виды исполнения.

В нормальном исполнении короткозамкнутая обмотка ротора выполняется из алюминиевого сплава, который заливается в пазы. Из медных проводов или шин обмотка ротора выполняется реже. К недостаткам асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором относятся:

- 1) большой пусковой ток, что при ограниченной мощности питающей станции (подстанции) может вызвать затруднения при пуске, а при недостаточном сечении питающих проводов и резкое падение напряжения в сети;
- 2) невозможность регулирования скорости;
- 3) сравнительно небольшая величина начального пускового момента, что в некоторых случаях затрудняет его пуск под нагрузкой и удлиняет время разбега.

Электродвигатели с фазным ротором применяются в тех случаях, когда вследствие указанных недостатков невозможно использовать асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

Обмотка ротора такого электродвигателя присоединена к контактными кольцам, а через щетки – к пусковому или регулировочному приспособлению (реостату). При необходимости улучшить пусковые характеристики (повышенное значение пускового момента и уменьшение скольжения) применяются короткозамкнутые электродвигатели с глубоким пазом в роторе или с двойной беличьей клеткой (с двумя обмотками) на роторе. По форме исполнения электродвигатели бывают: *защищенные* деталями, предохраняющими от попадания внутрь посторонних тел, водяных капель или струй определенного направления; эти электродвигатели имеют наибольшее распространение; *закрытые*, применяемые в пыльных помещениях, в химических и других производствах, где внешняя среда, пыль или взвешенные частицы, попадая в электродвигатель, могут повредить изоляцию обмотки или затруднить теплоотдачу; *взрывобезопасные – закрытые* в прочной оболочке, могущей выдержать большое давление газов, возникающее вследствие возможного воспламенения их от искрения внутри машины и препятствующей выходу пламени наружу.

в) Основные технические данные, обозначаемые в паспорте электродвигателя.

Номинальная мощность P_n указанная на его щитке, – это полезная механическая мощность на валу, развиваемая при номинальном режиме, и измеряемая в киловаттах.

Номинальная скорость вращения n_n , т. е. число оборотов в минуту, соответствующее номинальному режиму его работы.

Номинальный момент вращения M_n есть развиваемый электродвигателем на валу момент при номинальной мощности и номинальном числе оборотов, определяемый по формуле:

$$M_n = \frac{975 \times P_n}{n_n} \quad (\text{кг} \times \text{м}) \quad (1 - 11)$$

где: P_n – номинальная мощность *квт*, n_n – номинальное число оборотов в минуту, 975 – постоянное число.

Если номинальная мощность P_n выражена в лошадиных силах, соответствующая формула имеет вид:

$$M_n = \frac{716 \times P_n}{n_n} \quad (\text{кг} \times \text{м})$$

Номинальный ток I_H обычно обозначается на щитке электродвигателя и должен соответствовать его номинальному режиму, т. е. номинальной нагрузке. Номинальное напряжение U_H электродвигателя равно линейному напряжению питающей сети и должно соответствовать его номинальному режиму. Максимальный вращающий момент $M_{МАКС}$ – это наибольший вращающий момент, развиваемый на валу электродвигателя при постепенном повышении момента сопротивления.

Частота в сети и величина подведенного напряжения должны при этом равняться номинальным значениям. Начальный пусковой вращающий момент $M_П$ есть момент вращения при неподвижном роторе установившемся токе номинальном напряжении и частоте. Минимальный вращающий момент асинхронного короткозамкнутого электродвигателя в процессе пуска есть наименьший момент вращения, развиваемый электродвигателем при номинальном напряжении и номинальной частоте в сети.

Таблица 1–1. Отношение начального пускового момента к номинальному $M_П/M_H$

мощность, квт.	электродвигатели защищенного исполнения				электродвигатели закрытого, обдуваемого исполнения			
	скорость вращения (синхронная) об. мин.							
	3 000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
0,6	–	1,7	–	–	2,0	1,7	–	–
1,0	1,8	1,8	1,3	–	2,0	1,8	1,3	–
1,7	1,8	1,8	1,3	–	1,8	1,8	1,3	–
2,8	1,6	1,8	1,3	–	1,8	1,8	1,3	–
4,5	1,6	1,4	1,3	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
7	1,5	1,4	1,1	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
10	1,5	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
14	1,2	1,2	1,2	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
20	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
28	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
40	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,4	1,3
55	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3
75	1,0	1,0	1,0	–	1,1	1,1	1,2	–
100	1,0	1,0	–	–	1,1	1,1	–	–

Номинальный к. п. д, электродвигателя есть отношение его номинальной мощности на валу к активной мощности, потребляемой из сети при номинальном напряжении и номинальной частоте:

$$\eta_H = \frac{P_H \times 1000}{\sqrt{3} \times U_H \times I_H \times \cos \varphi_H} \quad (1 - 12)$$

где: $\cos \varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности, указанный на щитке электродвигателя.

г) Основные технические требования.

Асинхронные электродвигатели должны отдавать номинальную мощность при отклонениях напряжения сети в пределах 5 – 10% или при отклонении частоты сети в пределах $\pm 5\%$. При одновременном отклонении напряжения и частоты от номинальных значений электродвигатели должны отдавать номинальную мощность если сумма процентных значений отклонений не превосходит 10%. Отношение начального пускового момента вращения к номинальному для электродвигателей защищенного и закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором должно соответствовать табл. 1–1, а величины к. п. д. и коэффициента мощности в табл. 1–2 и 1–2а.

Таблица 1–2. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности $\cos \varphi$ для асинхронных трехфазных электродвигателей мощностью до 100 кВт.

Р кВт.	Электродвигатели защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором.								Электродвигатели закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором.							
	скорость вращения (синхронная) об. мин.															
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	η %				$\cos \varphi$				η %				$\cos \varphi$			
0,6	–	74,0	–	–	–	0,76	–	–	76,0	74,0	–	–	0,85	0,76	–	–
1,0	79,0	78,5	77,0	–	0,86	0,79	0,72	–	79,0	78,5	77,0	–	0,86	0,79	0,72	–
1,7	81,5	81,5	79,5	–	0,87	0,32	0,75	–	81,5	81,5	79,5	–	0,87	0,82	0,75	–
2,8	84,0	83,5	82,5	–	0,88	0,84	0,78	–	84,0	83,5	82,5	–	0,88	0,84	0,78	–
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,83	0,85	0,80	0,76	85,5	85,5	84,5	84,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78	87,5	87,0	86,0	86,0	0,39	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,83	0,82	0,80	87,5	87,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,83	0,83	0,81	83,0	83,5	83,0	87,5	0,90	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	83,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82	83,5	89,0	88,5	83,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	93,0	89,0	89,0	0,90	0,83	0,85	0,83	89,5	90,0	89,0	89,0	0,91	0,83	0,86	0,83
40	90,0	99,5	93,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84	89,5	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,87	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84	93,0	91,0	91,0	91,0	0,92	0,89	0,88	0,84
75	91,0	91,5	92,0	–	0,91	0,89	0,88	–	90,5	91,5	92,0	–	0,92	0,90	0,89	–
100	91,5	92,0	–	–	0,92	0,89	–	–	91,0	92,0	–	–	0,92	0,90	–	–

Р кВт.	Электродвигатели защищенного исполнения с фазным ротором с постоянно прилегающими щетками.					
	скорость вращения (синхронная) об. мин.					
	1500	1000	750	1500	1000	750
	η %			$\cos \varphi$		
0,6	–	–	–	–	–	–
1,0	–	–	–	–	–	–
1,7	–	72,5	–	–	0,72	–
2,8	78,0	75,5	–	0,82	0,74	–
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7,0	82,0	81,0	79,5	0,81	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	–	0,83	0,84	–
100	90,5	–	–	0,88	–	–

Предельные допустимые температуры частей асинхронных электродвигателей и превышения температур над температурой охлаждающей среды приведены в табл. 1–3. При этом принимается, что температура охлаждающей среды не превышает +35°C и измеряется термометром. При измерении температуры обмоток методом сопротивления предельная допустимая температура (и ее превышение) увеличивается на 5°C.

Таблица 1–2а. Коэффициент полезного действия η и коэффициент мощности $\cos\varphi$ для взрывобезопасных асинхронных трехфазных электродвигателей.

Мощность квт.	Скорость вращения (синхронная) об. мин.					
	1500	1000	750	1500	1000	750
	η %			$\cos\varphi$		
1,7		72,5			0,72	
2,8	78,0	75,5		0,82	0,74	–
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	–	0,88	0,84	–
100	90,5	–	–	0,88	–	–

Таблица 1–3. Допустимые превышения температуры частей электрических двигателей (ГОСТ 183–55).

Части электрических двигателей	изоляция класса А	изоляция класса В	абсолютная температура изоляция класса А	абсолютная температура изоляция класса В
Обмотка асинхронных электродвигателей	60	75	95	110
Сталь статора и ротора	65	85	100	120
Контактные кольца	70	90	105	125
Стержни обмотки ротора	65	95	100	130
Подшипники скольжения (с кольцевой смазкой)	45	45	–	–
Подшипники качения (шариковые и роликовые)	60	60	–	–

Для обмоток электродвигателей закрытого исполнения пределы превышения температуры, измеренные методом сопротивления, допускается повышать на 5°C.

2. По нагревостойкости электроизоляционные материалы делятся на пять классов:

класс А – с рабочей температурой до 105°C

класс Е – с рабочей температурой до 120°C (промежуточный между А и В)

класс В – с рабочей температурой до 130°C

класс F – с рабочей температурой до 155°C

класс Н – с рабочей температурой до 180°C

1–3. Обоснование производства расчета электродвигателей.

При перемотке электродвигателей могут быть следующие случаи, требующие производства нового расчета:

1. Поступившие в ремонт электродвигатели не имеют старой обмотки, их технические данные неизвестны, есть лишь заводские щитки с определенными данными, при этом требуется восстановить обмотку так, чтобы она удовлетворяла заводским данным.

В таких случаях, помимо производства расчета, необходимо также найти и параметры электродвигателя при его изготовлении на заводе, которые были бы положены в основу нового расчета, что не всегда удается.

2. Если у электродвигателя нет старой обмотки и заводского щитка на корпусе, вопрос нового расчета может быть решен двояко:

- а) электродвигатель должен быть рассчитан на заданную мощность и заданные обороты, для чего в первую очередь требуется определить возможность выполнения этого требования;
- б) требуется определить максимальную мощность, которая может быть получена от электродвигателя при заданной скорости вращения; правильность расчета может быть определена только после испытаний электродвигателя под нагрузкой, так как произведенный расчет даст только приблизительную величину мощности.

3. При полном или частичном повреждении обмотки статора, когда по уцелевшей части обмотки можно определить ее схему, число витков, шаг и сечение проводника, требуется восстановить электродвигатель с сохранением его данных по напряжению, оборотам и мощности, указанных в заводском щитке. В таких случаях правильным решением будет восстановление обмотки с сохранением ее прежних данных. Но и в этом случае требуется расчет, так как иногда не удастся уложить в паз прежнее число проводников. Такое явление может иметь место, если на заводе-изготовителе был применен провод с более тонкой изоляцией, чем имеющийся в наличии провод, либо изоляция паза была тоньше, чем та, которую приходится применять при ремонте. Наконец, в наличии может не оказаться провода требуемого размера, что ведет либо к уменьшению числа проводников в пазе, либо к снижению размера проводников.

4. При ремонте требуется перемотать электродвигатель на другое напряжение с сохранением прежнего числа оборотов, мощности и т. д. или на другое число оборотов, что связано с полным перерасчетом, так как мощность электродвигателя при этом не сохраняется, а при полном пересчете безразлично на какое напряжение вести новый расчет. Приведенные примеры не исчерпывают случаев встречающихся на практике и требующих пересчета или расчета ремонтируемых электродвигателей.

1–4. Исходные данные, связанные с расчетом и модернизацией асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт.

а) При пересчете или модернизации электродвигателей следует учитывать, что при конструировании их на заводах-изготовителях внутренний диаметр активной стали статора D_i и ее длина l определяли все прочие размеры электродвигателя, как-то: наружный диаметр D_a ; размер вала, подшипниковые щиты и др., а эти размеры в свою очередь зависят от мощности электродвигателя, его числа оборотов в минуту, нагрузки магнитной системы и электрической части, где использование магнитной системы в основном определяется значением магнитной индукции в воздушном зазоре $B\delta$, а использование электрической части – значением линейной нагрузки A .

б) Мощность электродвигателя на валу с заданными размерами активной стали пропорциональна произведению магнитной нагрузки стали, линейной нагрузки и определяется по формуле:

$$P_2 = k \times A \times B\delta \times n \text{ (кВт)} \quad (1 - 13)$$

где: P_2 – мощность, кВт., k – коэффициент, зависящий от размеров стали данного электродвигателя; $B\delta$ – индукция в воздушном зазоре, n – число оборотов; A – линейная нагрузка.

Линейная нагрузка:

$$A = \frac{2 \times m \times w_{\phi} \times I_1}{\pi \times Di \times a} \text{ а/см. } (1 - 14)$$

где: m – число фаз; w – число витков в фазе; I_1 – фазный ток, А; Di – внутренний диаметр активной стали, см., a – параллельных ветвей фазы.

в) При изменении числа витков по сравнению с расчетными, соответствующими определенному напряжению, меняются и магнитный поток, и индукция, которые обратно пропорциональны числу витков. Следовательно, уменьшение числа последовательно соединенных витков в фазе обмотки статора против расчетных увеличивает магнитную нагрузку стали, а увеличение числа последовательно соединенных витков уменьшает ее. Если величина индукции в стали находится на пределе, при пересчете желательно отступить от этой величины в сторону увеличения числа витков против расчетных.

г) Линейная нагрузка A не должна превышать общепринятых предельных значений и не увеличиваться при условии, если нагрев обмотки находится на пределе и, если при этом сохраняется класс изоляции и качество изоляционных лаков.

Существующие пределы значений A и $B\delta$ не являются предельными величинами. Если при ремонте использовать более совершенную электротехническую сталь и изоляционные материалы с более высокими качественными показателями, то значения A и $B\delta$ могут быть приняты при расчете выше, следовательно в заданных габаритах можно повысить электромагнитные и электрические нагрузки, а значит и мощность электродвигателя в целом.

д) Электромагнитные нагрузки. Рабочие и пусковые характеристики электродвигателя зависят от соотношения индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки A . Чем больше $B\delta$ и меньше A , тем хуже коэффициент мощности ($\cos \phi$) электродвигателя. Значения для $B\delta$ и A в зависимости от полюсного деления рекомендуется выбирать по кривым рис. 1-1, а для A также в зависимости от мощности электродвигателей – по кривым рис. 1-2.

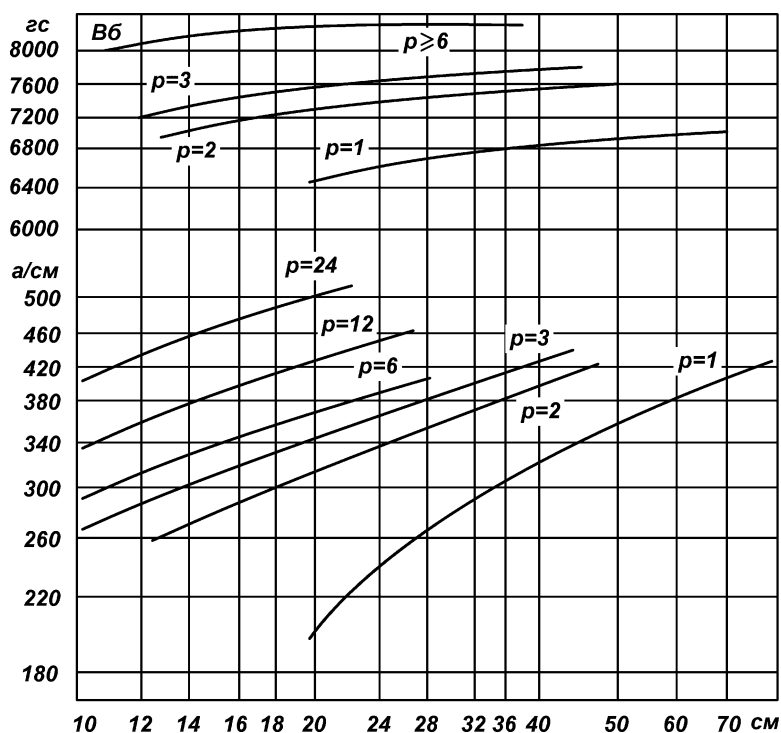


Рис. 1-1. Максимальная индукция в воздушном зазоре $B\delta$ и линейная нагрузка A в зависимости от полюсного деления τ .

Линейные нагрузки указаны для электродвигателей с радиальной вентиляцией, а при достаточно интенсивной аксиальной вентиляции нагрузки могут быть повышены примерно на 3,8%. Для закрытых и обдуваемых электродвигателей линейные нагрузки следует брать на 5–10% меньше приведенных на рис. 1–1. Иногда от закрытых электродвигателей требуется повышение их перегрузочной способности, в этом случае рекомендуется повысить индукцию в воздушном пространстве при одновременном снижении линейной нагрузки.

1–5. Значение качества изоляционных материалов при производстве расчетов.

На улучшение использования в асинхронных электродвигателях активных и конструктивных материалов большое влияние оказывает качество изоляционных материалов. Изоляционные материалы должны иметь возможно меньшую толщину без снижения их нагревостойкости, электрической и механической прочности. Существенное улучшение конструкции изоляции класса А низковольтных обмоток электродвигателей может быть достигнуто при использовании высокопрочных эмальпроводов типа винифлекс или им подобных и синтетических пленок. Триацетатцеллюзные пленки обладают хорошими диэлектрическими свойствами и удовлетворительной влагостойкостью. Применение эмальпроводов типа винифлекс для статорных обмоток и синтетических пленок для пазовой изоляции позволяет значительно увеличить коэффициент заполнения паза (см. п. "б") по сравнению с ныне применяемыми проводами ПЭЛБО и ПБД и пазовой изоляцией в виде лакоткани с электрокартоном и может дать большой эффект в отношении увеличения мощности или длительности и безаварийности работы электродвигателя. В нормальных электродвигателях мощностью до 100 кВт на долю меди (по сечению) в пазах статора падает около 20 – 30% полного сечения паза; остальное же пространство занято пазовой и междувитковой изоляцией, прокладками, клином, воздухом, пропиточным лаком и т. п. Коэффициент заполнения паза медью, или отношение общего сечения меди, расположенной в пазе, к сечению паза в свету, может быть определен по формуле:

$$f_{\text{мпк}} = \frac{q_{\text{м}} \times S_{\text{п}}}{Q_{\text{п}}} \quad (1 - 15)$$

где: $q_{\text{м}}$ – сечение провода, $S_{\text{п}}$ – число проводников в пазе; $Q_{\text{п}}$ – сечение паза в свету, мм². Этот коэффициент ($f_{\text{мпк}}$) может быть представлен в виде произведения трех коэффициентов, а именно:

$$f_{\text{мпк}} = f_{\text{м}} \times f_{\text{п}} \times f_{\text{к}}$$

где: $f_{\text{м}}$ – коэффициент заполнения изолированных проводов медью; $f_{\text{п}}$ – коэффициент заполнения изолированными проводами свободного пространства паза; $f_{\text{к}}$ – отношение сечения свободного пространства паза к сечению паза на свету.

Все приведенные коэффициенты для асинхронных электродвигателей общего применения серии А и АО практически имеют средние значения, приведенные (по данным ВНИИЭМ) в табл. 1–4. По данным, приведенным в таблице, видно, что коэффициент заполнения паза медью при обычных видах изоляции очень низок; основную роль в плохом использовании паза играет изоляция провода и паза.

Таблица 1–4

для обмоток на напряжение до 500 в	$f_{\text{м}}$	$f_{\text{п}}$	$f_{\text{к}}$	$f_{\text{мпк}}$
Из круглого провода ПЭЛБО	0,59	0,70	0,72	0,30

Таким образом, при переходе на более тонкую пазовую и витковую изоляцию с электрическими, механическими и тепловыми показателями, как в старой изоляции, можно повысить коэффициент заполнения паза медью ($f_{мпк}$) за счет повышения сечения проводников обмотки, что даст возможность без чрезмерного повышения температуры обмотки, повысить мощность электродвигателя или его надежность в эксплуатации. Если при модернизации электродвигателя исходить из условия сохранения приблизительно прежнего отношения максимального момента к номинальному и плотности тока, то коэффициент повышения мощности k_p электродвигателя может быть определен по формуле:

$$k_p = 1 + 0,75 \times (k_m - 1) \quad (1 - 16)$$

где: k_m – коэффициент повышения заполнения паза медью, равный отношению нового и старого коэффициентов заполнения паза медью. Приведенная формула дает для k_p достаточную степень точности при коэффициенте k_m , изменяющемся в пределах 1,0 – 1,3.

Из приведенной формулы явствует, что каждый процент повышения заполнения паза медью дает возможность повысить мощность электродвигателя на 0,75%. В электродвигателях старых серий применяется провод марок ПБД и ПЭЛБО, а в единой серии А и АО (мощностью 0,6–100 кВт) – ПЭЛБО диаметром 0,59–1,95 мм.

Изоляция паза статора этих двигателей обычно трехслойная и состоит из двух слоев электрокартона и одного слоя лакоткани между ними, или же двухслойная – из пленкоэлектрокартона. Односторонняя толщина пазовой изоляции составляет от 0,35 мм. в электродвигателях 0-го габаритов и до 0,6 мм. в электродвигателях 6–9-го габаритов. При этих условиях коэффициент заполнения паза статора медью составляет в среднем 0,30 изменяясь для электродвигателей от 3-го до 9-го габаритов в пределах 0,30–0,32. Если заменить в электродвигателе провод марки ПЭЛБО диаметром по меди равным 1 мм. (а вместе с изоляцией равным 1,21 мм), на провод марки ПЭВ-2, у которого двусторонняя толщина изоляции равна 0,11 мм, сохранив при этом внешний диаметр (с изоляцией), возможно диаметр голой меди увеличить до размера $1,21 - 0,11 = 1,1$ мм., или на 10%, что по сечению составит 21% и приведет к увеличению заполнения паза с 30 до 36,3%, где $k_m = 36,3/30 = 1,21$. Если в формулу (1-16) подставить коэффициент повышения заполнения паза медью $k_m = 1,21$, получится, что коэффициент повышения мощности такого электродвигателя $k_p \sim 1,16$. Конкретный пример лучшего использования асинхронного электродвигателя единой серии типа АО-63-4 (14 кВт, 1500 об/мин) при переходе с провода марки ПЭЛБО на провод марки ПЭВ-2 и при уменьшении пазовой изоляции вдвое приведен в табл. 1-5.

Таким образом, применяя новые виды изоляции для старых серий электродвигателей, в том числе и для электродвигателей серии А и АО, можно путем увеличения коэффициента заполнения паза медью повысить их мощность или, оставляя старую мощность повысить надежность их работы. Поэтому при модернизации электрических двигателей с изменением их обмоточных данных рекомендуется применять провод ПЭВ-2 с новыми видами изоляционных материалов для изоляции паза и новыми изоляционными лаками.

Таблица 1–5. Модернизированный асинхронный электродвигатель АО–63–4, 14 кВт, 220/380 в, 1500 об. мин. (по данным ВНИИЭМ)

Параметры электродвигателя	Исходный электродвигатель	Электродвигатель с уменьшенной толщиной изоляции
Коэффициент заполнения паза медью	29	38,5
Мощность электродвигателя, %	100	123
Число проводников в пазу статора	64	60
Марка провода	ПЭЛБО	ПЭВ–2
Толщина изоляции паза, мм.	0,6	0,3
Пазовый клин	дерево 4 мм.	слоистый пластик 3 мм.
Диаметр провода (голый изолированный), мм.	1,3/1,51	1,45/1,56
Коэффициент заполнения свободного пространства паза проводом, %	72,2	72,4
Коэффициент полезного действия, %	89,25	90,2
Коэффициент мощности	0,898	0,899
Вес обмоточного провода, %	100	114
Вес меди обмотки статора, %	100	117

1–6. Подготовка к расчету.

Для расчета или пересчета модернизируемых, или ремонтируемых электродвигателей в первую очередь следует определить их старые технические и обмоточные данные. Если на статоре частично или полностью сохранилась старая обмотка – по ней следует определить:

- сопряжение фаз (звезда или треугольник);
- тип обмотки;
- число катушечных групп в фазе и число катушек в группе и их соединение;
- общее число проводников в пазе, в том числе и параллельных проводов;
- размеры и марку провода (голый и с изоляцией);
- размеры вылета лобовых частей;
- число пазов;
- число пазов на полюс и фазу;
- шаг обмотки;
- внутренний диаметр активной стали.

Наружный диаметр активной стали статора обычно определяется как сумма внутреннего диаметра и двойной высоты спинки статора с зубцами:

$$D_a = D_i + 2 \times h_a + 2 \times h_z \quad (1 - 17)$$

где: h_a – высота спинки; h_z – высота зубца, D_i – внутренний диаметр активной стали.

Форма паза легко определяется снятием его свинцового оттиска с его последующим обмером. Вместо оттиска свинца можно применить легкий картон. Сечение паза Q_p в зависимости от его формы определяется по соответствующей формуле (см. табл. 1–6). Значение максимальной индукции в воздушном зазоре определяют по табл. 1–7. Меньшие значения индукции характерны для электродвигателей закрытого исполнения и меньших мощностей.

Индукцию в воздушном зазоре берут по табл. 1 – 7 и проверяют по формуле:

$$B\delta = 1,57 \times \frac{\Phi}{Q\delta} \quad (\text{гс}) \quad (1 - 18)$$

Значение магнитной индукции в зубце статора на $\frac{1}{3}$ его высоты (см. табл. 1 – 7) проверяют по формуле:

$$B_z = 1,57 \times \frac{\Phi}{0,95 \times Q_z} \quad (\text{гс}) \quad (1 - 19)$$

Значение магнитной индукции в спинке статора берут по табл. 1 – 7 и проверяют по формуле:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \times 0,95 \times Q_a} \quad (\text{гс}) \quad (1 - 20)$$

Примечания: 1. При открытых пазах на статоре для зубцов ротора следует выбирать индукцию на 5–10% ниже. 2. Если в ярме статора есть выемки для крепления пакетов, а также аксиальные вентиляционные каналы, индукцию ярма можно принимать 18000 гс. Значение линейной нагрузки A для малых электродвигателей (мощностью до 10 кВт) 90 – 259 а/см., а для больших – 150 – 380 а/см., (рис. 1 – 2) и проверяют по формуле (1 – 14).

Значение плотности тока обмотки статора определяют по табл. 1 – 8 и проверяют по формуле:

$$\Delta_i = \frac{I_\Phi}{Q_{\text{ПРОВ}}}$$

Величина характеризующая степень нагрева электродвигателей определяется произведением $A \times \Delta_i$, которое должно находиться при нормальном нагреве в пределах 1000 – 2200. При выборе типа статорной обмотки и определении ее отдельных проводников необходимо:

1. Учитывать, что при выборе степени укорочения шага обмотки статора наивыгоднейшим является укорочение в пределах 0,75 – 0,83 диаметрального шага.
2. Стремиться к максимальному использованию площади паза, применяя один или несколько параллельных проводов большого сечения вместо параллельных проводов меньшего сечения, если при этом потери в меди не возрастут.
3. Иметь в виду, что коэффициент заполнения паза с учетом пазовой и межслойной изоляции характеризует степень использования паза (см. табл. 1 – 9), особенно пазов трапециевидной и овальной формы и определяется по формуле:

$$f_{\text{из}} = \frac{n_{\text{п}} \times d^2 \times 0,785}{Q_{\text{п}}} \quad (1 - 21)$$

где: $n_{\text{п}}$ – число проводников; d – диаметр проводника; $Q_{\text{п}}$ – сечение паза (берут по табл. 1 – 9). При выполнении обмотки секциями равной формы или катушечной обмоткой коэффициент заполнения паза $f_{\text{из}}$ может быть доведен до 0,48.

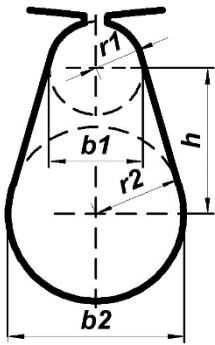
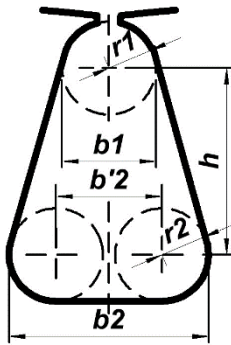
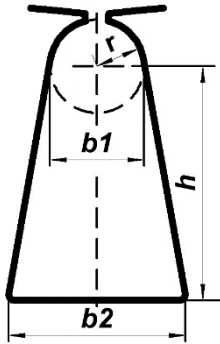
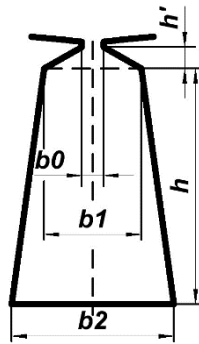
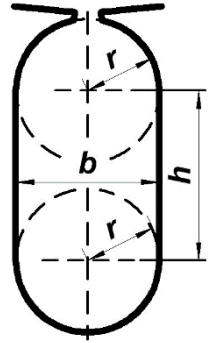
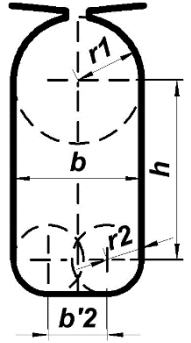
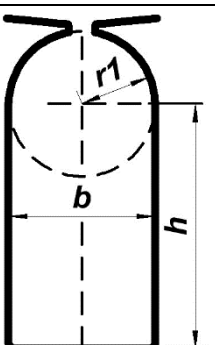
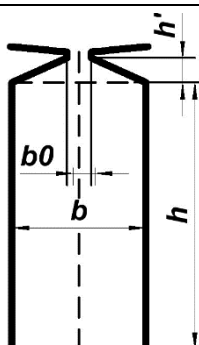
4. При укладке проводников обмотки через шлиц паза, максимальный диаметр обмоточного провода брать по диаметру провода с изоляцией на 0,3 – 0,4 мм. меньше ширины шлица.

5. Катушечную обмотку в протяжку выполнять проводом ПБД или ПБО.

6. Не применять прямоугольного провода с сечением, приближающимся к квадрату, во избежание скрутки провода при намотке секций или катушек.

7. Не применять прямоугольного провода с соотношением сторон более чем 3 : 1 во избежание технологических трудностей при намотке.

Таблица 1-6. Формулы для определения площадей пазов статора наиболее употребительных форм.

1		2	
$Q_{\Pi} = \frac{\pi}{2} \times (r_1^2 + r_2^2) + \frac{h}{2} \times (b_1 + b_2)$		$Q_{\Pi} = \frac{\pi}{2} \times (r_1^2 + r_2^2) + \frac{h}{2} \times (b_1 + b_2) + r_2 \times b'_2$	
3		4	
$Q_{\Pi} = \frac{\pi}{2} \times r^2 + \frac{h}{2} \times (b_1 + b_2)$		$Q_{\Pi} = \frac{h}{2} \times (b_1 + b_2) + \frac{h'}{2} \times (b_0 + b_1)$	
5		6	
$Q_{\Pi} = \pi \times r^2 + h \times b$		$Q_{\Pi} = \frac{\pi}{2} \times (r_1^2 + r_2^2) + h \times b + (r_2 \times b'_2)$	
7		8	
$Q_{\Pi} = \frac{\pi}{2} \times r^2 + h \times b$		$Q_{\Pi} = h \times b + \frac{h'}{2} \times (b_0 + b)$	

число $\pi = 3,14159$

Таблица 1–7. Значения магнитной индукции
для нормальных асинхронных электродвигателей.

Участки магнитной цепи	Индукция, гс
Воздушный зазор	$2p = 2$ 6000 – 6700 $2p > 2$ 6500 – 8500
Ярмо <i>статора</i> (спинка)	$2p = 2$ 12000 – 17000 $2p > 2$ 10000 – 15000
Зубцы <i>статора</i> в наиболее узком сечении при пазе с параллельными стенками	16000 – 21000
Зубцы <i>статора</i> (в середине, а также трапецевидных и грушевидных пазах)	13000 – 17000
Зубцы <i>ротора</i> (в наиболее узком сечении в пазах с параллельными стенками)	16000 – 22000
Зубцы <i>ротора</i> (в середине, а также при трапецевидных и грушевидных пазах)	14000 – 18000
Ярмо <i>ротора</i> (спинка)	10000 – 16000

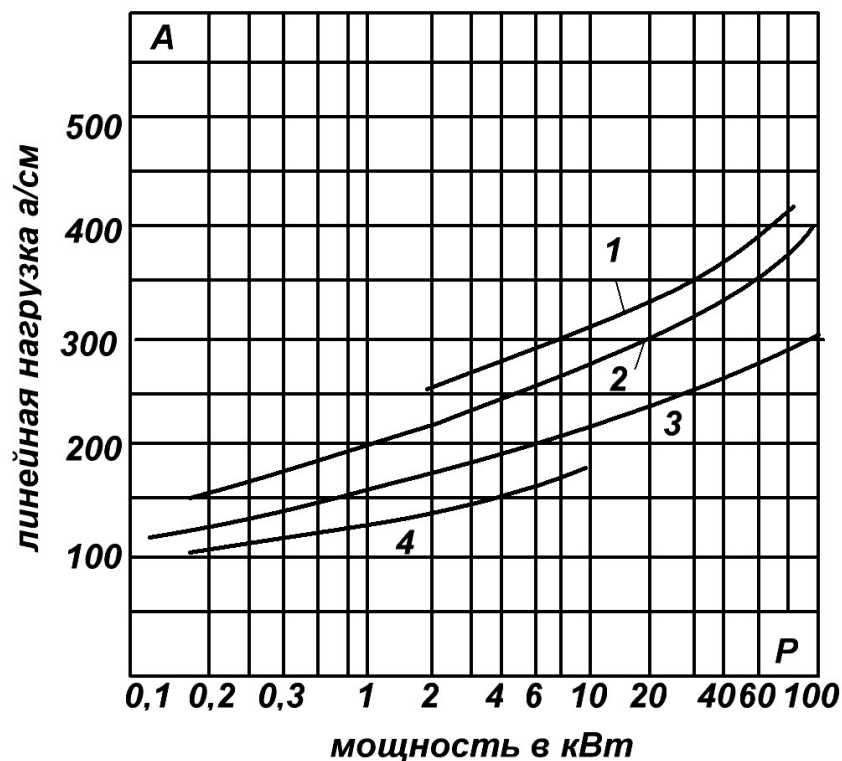


Рис. 1 – 2. Кривые зависимости линейной нагрузки от мощности асинхронных электродвигателей. 1 – очень сильно вентилируемые; 2 – нормально вентилируемые, 3 – закрытые обдуваемые, 4 – закрытые вентилируемые (продуваемые).

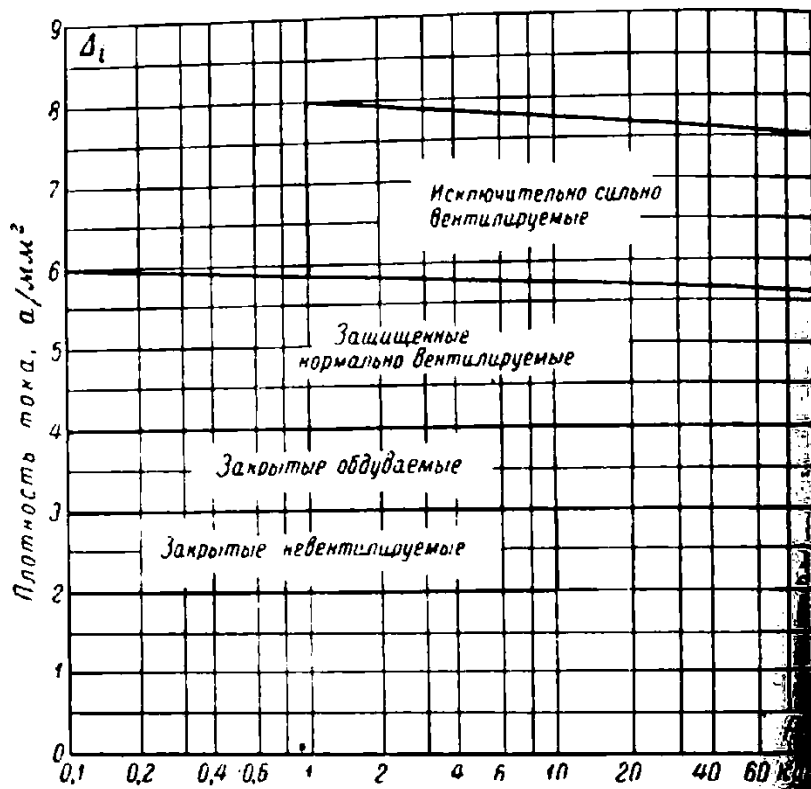


Таблица 1 – 8.
Рекомендуемые плотности
тока в обмотке статора
трехфазных асинхронных
двигателей мощностью до
100 квт.

Таблица 1-9. Коэффициенты заполнения паза
(с учетом пазовой и межслойной изоляции).

Тип паза	Тип обмотки	Пределы коэффициента заполнения паза
Трапецевидный с небольшими закруглениями в углах на дне паза	Однослойная	0,36 – 0,43
	Двухслойная	0,33 – 0,40
Овальный с очертанием по окружности	Однослойная	0,40 – 0,48
	Двухслойная	0,36 – 0,43

1-7. Восстановление обмоточных данных электродвигателя, у которого нет паспорта и обмоточных данных, пример расчета.

Для восстановления обмоток практически требуется полный расчет электродвигателя. Расчет иногда приходится неоднократно повторять, так как электродвигатели разных выпусков (серий) имеют различные магнитные и электрические нагрузки, зависящие от мощности, числа оборотов и системы вентиляции электродвигателей. Зависимость кажущейся мощности, потребляемой электродвигателем из сети, от нагрузки активных материалов и основных его размеров выражается формулой:

$$P_s = 1,161 \times A \times B \delta \times D i^2 \times l_0 \times n \times k_1 \times 10^{-12} \quad (1 - 22)$$

где: $D i$ – диаметр расточки статора, см.; l_0 – расчетная длина активной стали, см.; за величину l_0 может быть принята фактическая длина стали за вычетом половины ширины всех вентиляционных каналов (с учетом изоляции между листами стали); k_1 – обмоточный коэффициент (для обмоток с диаметральной шаг может быть принят равным 0,96); A – линейная нагрузка, а/см; n – число оборотов в минуту.

До начала расчета снимают все размеры активной стали с вентиляционными каналами, пазов, зубцов. Потом задаются числом оборотов (в соответствии с потребностью) и проверяют степень магнитной загрузки стали. Слишком большими нагрузками стали не следует задаваться (см. табл. 1-7).

Задавшись числом оборотов, определяют длину полюсного деления:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} \quad (1 - 23)$$

где: Di – диаметр расточки статора, см.; $2p$ – число полюсов.

Определяют величину магнитного потока одного полюса по формуле:

$$\Phi = 0,637 \times B\delta \times \tau \times l_0 \quad (1 - 24)$$

где: $B\delta$ – максимальная индукция в воздушном зазоре, которой задаются по табл. 1–7, гс;
 l_0 – расчетная длина активной стали, см. Определяют максимальную индукцию в наиболее узком месте зубцов:

$$B_z = 1,57 \times \frac{\Phi}{0,95 \times Q_z} \quad (\text{гс})$$

где: Q_z – сечение зубцов в наиболее узком месте, приходящееся на одно полюсное деление, см². Определяют индукцию в спинке статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \times 0,95 \times Q_a} \quad (\text{гс})$$

где: Q_a – сечение спинки статора, см². Коэффициент 0,95 учитывает изоляцию между листами стали. После подсчета всех величин их сопоставляют с данными табл. 1–7.

Если при сопоставлении получится, что индукция в спинке статора окажется меньше, чем следует, это значит, что принятое число полюсов $2p$ больше чем следует. Если величина индукции окажется больше, чем указано в табл. 1–7, это покажет, что принятое при расчете число полюсов взято меньше, чем следует. Если получится, что индукция в зубцах и спинке больше рекомендуемых величин, это покажет, что значение индукции в воздушном зазоре $B\delta$ – велико. Таким методом определяют число полюсов для заданного электродвигателя, а отсюда и индукцию $B\delta$ и поток Φ . После проведенных подсчетов задаются по кривым рис. 1–1 величиной линейной нагрузки A и определяют по формуле (1–22) потребляемую электродвигателем мощность P_s .

Затем по кажущейся мощности определяют мощность электродвигателя на валу:

$$P_2 = P_s \times \eta \times \cos\varphi \quad (1 - 25)$$

где: η и $\cos\varphi$ – к. п. д. и коэффициент мощности, определяют по табл. 1–2. Зная фазное напряжение обмоток статора U_1 , при котором электродвигатель должен работать, определяют и число последовательно соединенных витков в обмотке одной фазы:

$$w_\Phi = \frac{U_1 \times 10^6}{2,22 \times k_1 \times \Phi} \quad (1 - 26)$$

Коэффициент k_1 для однослойных обмоток с диаметральной шагом может быть принят равным единице, а для двухслойных – по табл. 1–10 в зависимости от сокращения шага. По потребляемой электродвигателем мощности и линейному напряжению U_L определяют и линейный ток:

$$I_L = \frac{P_s \times 1000}{\sqrt{3} \times U_L} \quad (1 - 27)$$

По величине тока выбирают сечение проводников. В некоторых случаях может оказаться более целесообразным применение параллельных цепей обмоток. Сечение проводника определяют по допустимой плотности тока.

Таблица 1–10. Обмоточный коэффициент в зависимости от коэффициента распределения обмотки и сокращения ее шага.

Число катушек в катушечной группе	Коэффициент распределения обмотки	Сокращение шага обмотки в долях единицы βy									
		0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
		Обмоточный коэффициент									
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,891	0,853	0,809	0,760	0,700
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887	0,855	0,819	0,777	0,730	0,672
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885	0,854	0,817	0,775	0,728	0,671
5 – 7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884	0,853	0,816	0,774	0,727	0,670
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883	0,852	0,815	0,773	0,727	0,659
9 и более	0,955	0,952	0,944	0,928	0,908	0,882	0,851	0,815	0,773	0,720	0,668

Пример расчета обмотки статора и ротора при отсутствии их паспортных данных.

Работа электродвигателя предполагается от сети напряжением 500 в.
Размеры статора и ротора, снятые с натуры, следующие:

$D_i = 310$ мм. – диаметр расточки;
 $D_a = 460$ мм. – внешний диаметр;
 $l = 195$ мм. длина активной стали с воздушными каналами;
 $l_c = 165$ мм. длина активной стали без воздушных каналов;
 $h_a = 43$ мм. высота спинки активной стали статора;
 $z_1 = 72$ – число пазов статора;
 $b_{z1} = 7,6$ мм. – ширина зубца;
 $h_{a2} = 42$ мм. – высота спинки активной стали ротора;
 $z_2 = 90$ – число пазов ротора;
 $h_{23} = 21$ мм. – высота зубца ротора;
 $b_{23} = 4,3$ мм. – ширина зубца.

При расчете указывается заданное число оборотов в минуту. В данном случае число оборотов в минуту принято 1500 об. мин., то есть $2p = 4$.

Расчет.

По формуле (1–23) определяют величину полюсного деления:

$$\tau = \frac{\pi \times D_i}{2p} = \frac{3,14 \times 31,0}{4} = 24,3 \text{ см.}$$

Задаются индукцией в воздушном зазоре в соответствии с табл. 1–7. Для данного случая принимается:

$$B\delta = 7800 \text{ гс.}$$

Определяют расчетную длину активной стали:

$$l_0 = 19,5 - (0,5 \times 3) = 18 \text{ см.}$$

где: 0,5 см. длина трех воздушных каналов.

По формуле (1–24) определяют величину магнитного потока:

$$\Phi = 0,637 \times B\delta \times \tau \times l_0 = 0,637 \times 7800 \times 24,3 \times 18 = 2175000 \text{ мкс}$$

Определяют сечение зубцов статора, приходящееся на полюсное деление:

$$Q_z = \frac{z_1}{2p} \times b_{z1} \times l_c = \frac{72}{4} \times 0,76 \times 16,5 = 226 \text{ см}^2 \quad (1 - 28)$$

По формуле (1-19) определяют максимальную индукцию в зубце статора:

$$B_z = 1,57 \times \frac{\Phi}{0,95 \times Q_z} = 1,57 \times \frac{2175000}{0,95 \times 226} = 15900 \text{ гс}$$

По формуле (1-20) определяют величину индукции в спинке статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \times 0,95 \times l_c \times h_a} = \frac{2175000}{2 \times 0,95 \times 16,5 \times 4,3} = 16200 \text{ гс}$$

Полученную величину сопоставляют с величиной по табл. 1-7, откуда видно, что индукция получилась завышенной, поэтому вместо $2p = 4$ приходится переходить на $2p = 6$ и повторно произвести подсчет:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} = \frac{3,14 \times 31,0}{6} = 16,2 \text{ см}$$

$$\Phi = 0,637 \times B\delta \times \tau \times l_0 = 0,637 \times 7800 \times 16,2 \times 18 = 1450000 \text{ мкс}$$

$$Q_z = \frac{z_1}{2p} \times b_{z1} \times l_c = \frac{72}{6} \times 0,76 \times 16,5 = 150,5 \text{ см}^2$$

$$B_z = 1,57 \times \frac{\Phi}{0,95 \times Q_z} = 1,57 \times \frac{1450000}{0,95 \times 150,5} = 15900 \text{ гс}$$

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \times 0,95 \times l_c \times h_a} = \frac{1450000}{2 \times 0,95 \times 16,5 \times 4,3} = 10700 \text{ гс}$$

Ротор.

Максимальная индукция в зубцах ротора в наиболее узком месте, где ширина зуба равна 0,5 см., а сечение равно:

$$Q_{z2} = \frac{z_2}{2p} \times b_{z2} \times l_c = \frac{90}{6} \times 0,5 \times 16,5 \approx 124 \text{ см}^2$$

$$B_{z2} = 1,57 \times \frac{\Phi}{0,95 \times Q_{z2}} = 1,57 \times \frac{1450000}{0,95 \times 124} = 19300 \text{ гс}$$

определяют величину индукции в спинке ротора:

$$B_{a2} = \frac{\Phi}{2 \times 0,95 \times l_c \times h_a} = \frac{1450000}{2 \times 0,95 \times 16,5 \times 4,2} = 11000 \text{ гс}$$

Полученные величины индукции соответствуют данным табл. 1-7, и поэтому следует остановиться на $2p = 6$. В особых случаях, когда необходим электродвигатель на $2p = 4$, можно оставить $2p = 4$ для работы на пониженную мощность.

Если электродвигатель старых серий, где активная сталь обычно недостаточно использована, можно грузить его на номинальную мощность, предварительно испытав его. Если ориентировочно принять мощность электродвигателя 40 – 60 кВт, то, пользуясь кривой 2 на рис. 1-2, для электродвигателя с нормальной вентиляцией величину линейной нагрузки A принимают равной 330.

По формуле (1-22) определяют потребляемую электродвигателем мощность от сети:

$$P_s = 1,161 \times A \times B \delta \times D i^2 \times l_0 \times n \times k_1 \times 10^{-12} \\ = 1,61 \times 330 \times 7800 \times 31^2 \times 18 \times 1000 \times 0,96 \times 10^{-12} = 49,5 \text{ кВА}$$

Для данной мощности по табл. 1-2 определяют величину к. п. д., η и коэффициента мощности $\cos \varphi$:

$$\eta = 0,9; \cos \varphi = 0,86$$

Затем подсчитывают мощность на валу см. формулу (1-25):

$$P_2 = P_s \times \eta \times \cos \varphi = 49,5 \times 0,9 \times 0,86 = 38 \text{ кВт.}$$

По формуле (1-26) подсчитывают число последовательно соединенных витков в одной фазе статорной обмотки при соединении звездой:

$$w_\Phi = \frac{U_1 \times 10^6}{2,22 \times k' \times \Phi}$$

где: k' – коэффициент для однослойных обмоток с диаметральным шагом, может быть принят равным единице. Для двухслойных обмоток коэффициент берется в зависимости от сокращения шага обмотки по табл. 1-10. Предполагая выполнить обмотку двухслойной с сокращением шага, равным 0,85, для которой $k' = 0,972$ (см. табл. 1-10), определяют число последовательно соединенных витков в обмотке одной фазы:

$$w_\Phi = \frac{U_1 \times 10^6}{2,22 \times k' \times \Phi} = \frac{\frac{500}{\sqrt{3}} \times 10^6}{2,22 \times 0,972 \times 1450000} = 92$$

По формуле (1-27) определяют линейный ток:

$$I_L = \frac{P_s \times 1000}{\sqrt{3} \times U_L} = \frac{49,5 \times 1000}{1,73 \times 500} = 57,2 \text{ а}$$

В соответствии с табл. 1-8 принимают допустимую плотность тока, равную 5 а/мм. (для электродвигателя с нормальной вентиляцией) и определяют сечение обмоточного провода:

$$q_\Pi = \frac{I_L}{\Delta_i} = \frac{57,2}{5} = 11,44 \text{ мм}^2$$

Так как обычно шлиц паза статора равен 3 мм., а обмотку следует укладывать через шлиц, поэтому удобнее для свободного прохода провода через шлиц при производстве обмоточных работ принять четыре параллельные ветви в обмотке, применив для этого круглый провод сечением:

$$\frac{11,44}{4} = 2,86 \text{ мм}^2$$

По каталогу на медь ближайшее сечение 2,99 мм² с диаметром 1,93 мм.

Определяют число пазов на фазу:

$$n_{\Pi} = \frac{z}{3} = \frac{72}{3} = 24$$

Каждая ветвь займет $24/4 = 6$ пазов, а число проводников в пазе при $w_{\Phi} = 92$ составит $92/3 = 30$ и $2/3$. Для осуществления двухслойной обмотки число проводников в пазе округляют до величины равной 30, где в каждой катушке будет по $30/2 = 15$ витков. В каждой фазе будет $2p = 6$ катушечных групп, а каждая группа будет состоять из четырех катушек, соединенных параллельно. Всего катушек по числу пазов 72, а в каждой фазе будет $72/3 = 24$ катушки, что при наличии шести катушечных групп дает в каждой группе по $24/6 = 4$ катушки. Катушечные группы соединяют последовательно. Обмотка ротора, как обычно, выполняется двухслойной стержневой, волновой, по 2 стержня сечением $2,8 \times 8,5 = 23,3 \text{ мм}^2$, а фазы соединены звездой.

Определяют ток ротора по формуле:

$$I_2 = 0,85 \times \frac{I_1 \times k_1 \times w_1}{k_2 \times w_2} \quad (1 - 29)$$

где: k_1 – обмоточный коэффициент статорной обмотки, равный 0,972
 w_2 – число последовательно соединенных витков ротора в каждой фазе, равное $90/3 = 30$;
 k_2 – обмоточный коэффициент роторной обмотки, равный 0,96; I_1 – ток статора;
0,85 – учитывает, что ампер-витки статора на 15% больше ампер-витков ротора;

$$I_2 = 0,85 \times \frac{I_1 \times k_1 \times w_1}{k_2 \times w_2} = 0,85 \times \frac{57,2 \times 0,972 \times 92}{0,96 \times 30} = 150 \text{ а}$$

Плотность тока в роторной обмотке:

$$A_2 = \frac{150}{23,8} = 6,25 \text{ а/мм}^2$$

Напряжение между кольцами ротора при неподвижном роторе определяется по формуле:

$$E_2 = U_{\text{л}} \times \frac{w_2 \times k_2}{w_1 \times k_1} = 500 \times \frac{30 \times 0,96}{92 \times 0,972} = 162 \text{ в} \quad (1 - 30)$$

Таким образом электродвигатель имеет следующие данные:

$$P_2 = 38 \text{ кВт.}, n = 1000 \text{ об. мин.}, (\text{синхронных}), I_1 = 57,2 \text{ а}, U = 500 \text{ в}, \\ I_2 = 150 \text{ а}, \text{ напряжение на кольцах ротора } 162 \text{ в.}$$

1–8. Упрощенный метод определения технических данных электродвигателей.

а) Определение количества витков в одной секции.

Если требуется определить данные электродвигателя у которого отсутствуют старая обмотка и табличка с техническими данными, то после снятия основных размеров активной стали статора следует определить возможное наименьшее число полюсов, допустимое для активной стали этого электродвигателя, по формуле:

$$2p = 0,5 \times \frac{Di}{ha} \quad (1 - 31)$$

где: Di – внутренний диаметр активной стали, ha – высота спинки активной стали статора.

Полученный результат следует округлить до ближайшего четного числа, учитывая при этом, что для меньшего числа полюсов данный электродвигатель не будет пригоден. Если требуется перемотать электродвигатель на большее число полюсов, чем число, полученное по формуле (1-31), необходимо предварительно проверить величину индукции в воздушном зазоре $B\delta$. Для определения числа витков в фазе необходимо предварительно определить площадь полюсного деления по формуле:

$$Q\delta = \frac{\pi \times Di \times l}{2p} \text{ см}^2 \quad (1-32)$$

где: l – длина активной стали с каналами, после чего по графику рис. 1-3 определяют количество витков.

Число последовательно соединенных витков, получаемых по графику рис. 1-3, соответствует напряжению $U_{\text{л}} = 220 \text{ в}$, для электродвигателей с напряжением U' , отличным от 220 в, можно пользоваться этим же графиком, но при этом полученные данные $w_{\text{ф}}$ пересчитывают по формуле:

$$w' = w_{\text{ф}} \times \frac{U'}{220}$$

где: $w_{\text{ф}}$ – число витков, полученных по графику; U' – напряжение электродвигателя, отличное от 220 в; w' – новое число витков, соответствующее U' .

При определении числа витков фазы следует учитывать, что, если полученное число не делится на $z_1/6$ (z_1 – число пазов статора), следует принимать ближайшее другое число кратное $z_1/6$. Найденное таким путем число витков в фазе является приближенным.

Число витков в каждой секции определяется делением числа витков фазы на число секций в ней, где для катушечных и однослойных обмоток число секций в фазе должно равняться $1/6$ части всех пазов статора ($z_1/6$), а для двухслойных обмоток – $z_1/3$. Число витков в секции во всех случаях должно быть целым числом и кратным числу $z_1/6$ для однослойных и катушечных обмоток и $z_1/3$ для двухслойных и при этом равняться четному числу.

Руководствуясь табл. 1-7 допустимых величин магнитной индукции в спинке статора и исходя из полученного количества витков, действительную индукцию проверяют по формуле:

$$Ba = \frac{\Phi}{2 \times 0,95 \times Qa}$$

где: Qa – сечение спинки статора, определяемое по формуле:

$$Qa = la \times ha$$

где: la – длина активной стали статора, см., ha – высота спинки стали статора, см.

площадь полюсного деления:

$$Q\delta = \frac{3,14 \times Di \times l}{2p} \text{ см}^2$$

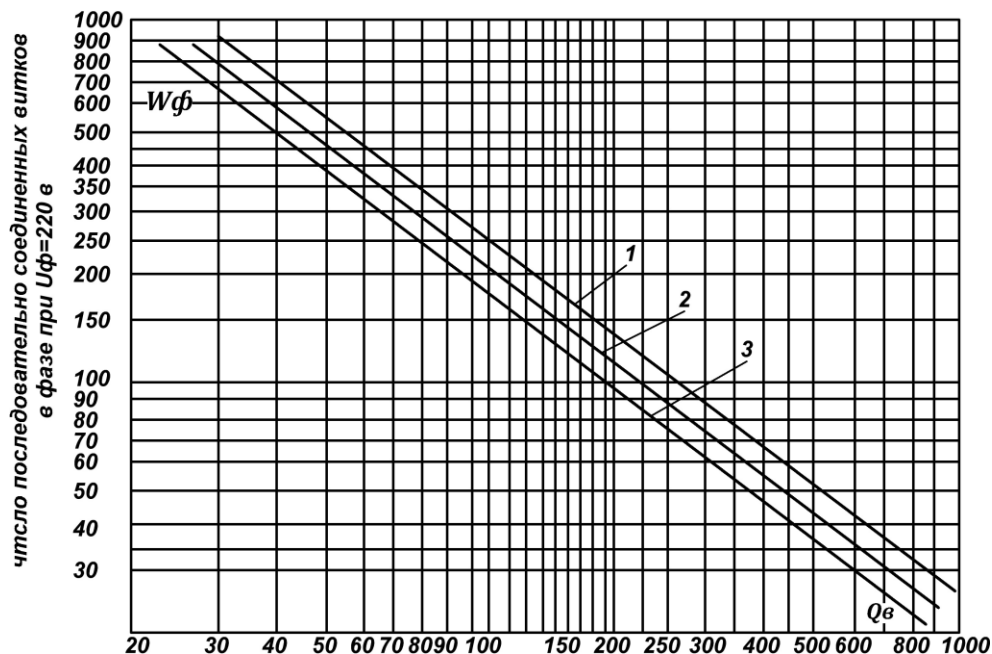


Рис. 1–3. График для определения последовательно соединенных витков в фазе.

- 1 – для электродвигателей АД, А, АЛ, АОЛ и др. у которых $0,5 \times D/h < 3$;
- 2 – для электродвигателей, кроме тех, у которых $2p = 2$;
- 3 – для электродвигателей Р, АД, МА, АТ, МТ и пр.

Если полученная величина индукции выходит за пределы данных табл. 1–7, следует число витков, полученное по графику рис. 1–3, изменить на близкое число, но тоже кратное $z/6$, и снова проверить величину индукции в спинке по формуле:

$$Ba_1 = Ba \times \frac{w}{w_1} \quad (\text{гс}) \quad (1 - 34)$$

где: Ba_1 – новое значение индукции в спинке; w_1 – новое число витков фазы, кратное $z/6$. При определении данных для электродвигателей мощностью выше 10 кВт следует проверить и величину индукции в воздушном зазоре по формуле:

$$B\delta = \frac{1,57 \times 10^8}{Q\delta \times w_1} \quad (\text{гс}) \quad \text{а полученную величину сопоставить с данными табл. 1–7.}$$

Число витков, определенных по графику рис. 1–3, можно считать удовлетворительным, если величины индукции Ba и $B\delta$ не выходят за пределы данных табл. 1–7.

Следует учесть, что так же определяют и допустимые значения индукции в зубцах статора и сердечнике ротора. В двухслойных обмотках с укороченным шагом количество витков следует разделить на коэффициент 0,92 как средний из встречающихся коэффициентов.

б) Определение сечения обмоточного провода.

Зная число витков в одной секции при однослойной обмотке, эту величину можно принимать за количество проводников в пазе. Определяя после замера паза на статоре его сечение (см. табл. 1–6) и принимая величину коэффициента заполнения паза проводом с изоляцией равной 0,40 определяют полное сечение изолированного провода в пазах:

$$S_M = Q_{\Pi} \times k_{\Pi} \quad \text{мм}^2$$

где: S_M – полное сечение всего изолированного провода в пазах, мм^2 ; Q_{Π} – площадь сечения паза, мм^2 ; k_{Π} – коэффициент заполнения паза.

Зная полное сечение меди и число витков в пазе, определяют и сечение изолированного проводника:

$$S_{\text{пр}} = \frac{S_M}{w} \text{ мм}^2$$

Для определения величины тока пользуются формулой: $I_{\Phi} = S_{\text{пр}} \times \Delta_1$
где: Δ_1 – плотность тока, величина которой определяется по табл. 1–8.

в) Определение мощности электродвигателя по данным его размеров.

Если размеры и скорость вращения электродвигателя известны, то может быть определена и его мощность. Для определения мощности трехфазных асинхронных электродвигателей можно применить следующую формулу:

$$P_2 = C \times D_i^2 \times l \times n \text{ кВт} \quad (1 - 35)$$

где: C – постоянная мощности, определяемая по кривой рис. 1–4; D_i – внутренний диаметр активной стали статора, см.; l – длина активной стали статора по его оси, включая и вентиляционные каналы, см.; n – синхронное число оборотов в минуту. Приведенная кривая на рис. 1–4 и формула (1–35) могут быть использованы для определения мощности при перемотке электродвигателей, когда задана скорость вращения и известны размеры активной стали статора.

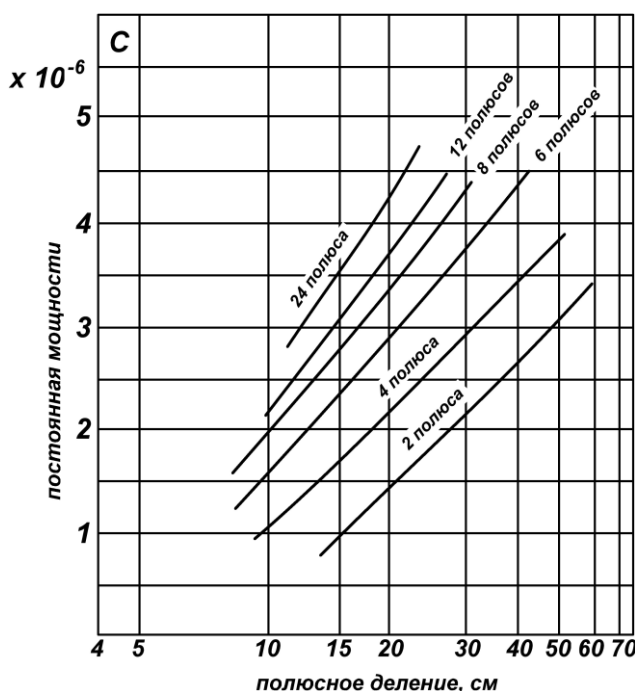


Рис. 1–4. Постоянная мощности для асинхронных двигателей в зависимости от полюсного деления.

г) Примеры упрощенного расчета асинхронных электродвигателей, подлежащих ремонту.

Пример 1. Электродвигатель с внутренним диаметром расточки стали статора $D_i = 195$ мм., длиной активной стали $l = 128$ мм., высотой спинки статора $h_0 = 20$ мм., числом пазов $z_1 = 36$ и диаметром конца вала, равным 50 мм. Требуется определить его минимальное число полюсов, магнитные нагрузки и мощность.

Решение. По формуле (1–31) определяют наименьшее число полюсов, допустимое для электродвигателя с приведенными размерами:

$$2p = 0,5 \times \frac{Di}{ha} = 0,5 \times \frac{19,5}{2,0} = 4,85 = 4$$

2. Для определения приблизительного числа витков в фазе по кривой рис. 1–3 следует предварительно определить площадь полюсного деления и проверить по формуле (1–32):

$$Q\delta = \frac{\pi \times Di \times l}{2p} = \frac{3,14 \times 19,5 \times 12,8}{4} = 195 \text{ см}^2$$

3. Зная $Q\delta$ по кривой рис. 1–3 определяют число витков в фазе: $w_\phi = 90$. Так как при однослойных обмотках число секций должно $z_1/6 = 36/6 = 6$, то число витков $w_\phi = 90$ приемлемо.

4. При полученном числе витков необходимо определить величину индукции в спинке статора, для чего предварительно определяют ее сечение:

$$Qa = la \times ha = 12,8 \times 2,0 = 25,6 \text{ см}^2.$$

5. По формуле (1–20) определяют величину индукции:

$$Ba = \frac{\Phi}{2 \times 0,95 \times Qa} = \frac{961 \times 800}{2 \times 0,95 \times 25,6} = 18800 \text{ гс}$$

где: Φ определяется по формуле (1–24).

При сравнении полученного результата с данными табл. 1–7 видно, что полученная индукция чрезмерно велика, поэтому необходимо увеличить число витков в фазе, исходя из формулы (1–34). Если принять величину w равной 102 ($90 + 12$), то

$$Ba_1 = 18000 \times \frac{90}{102} = 16600 \text{ гс}$$

что также не соответствует данным табл. 1–7, поэтому принимается число $w = 132$, кратное числу $z/36 = 36/6 = 6$ и тогда

$$Ba_1 = 18000 \times \frac{90}{132} = 12800 \text{ гс}$$

Эта величина индукции соответствует данным табл. 1–7.

6. Зная число витков в фазе, можно определить и число витков в секции для однослойной катушечной обмотки:

$$w_c = \frac{132 \times 6}{z} = \frac{132 \times 6}{36} = 22 \text{ витка}$$

Если требуется намотать электродвигатель двухслойной обмоткой с диаметральным шагом, то число витков будет:

$$w = \frac{w_c}{2} = \frac{22}{2} = 11 \text{ витков, при укороченном шаге: } w_y = \frac{11}{0,92} = 12 \text{ витков}$$

7. Для определения мощности электродвигателя следует пользоваться формулой (1–35) и кривой рис. 1–4, для чего предварительно определяют величину полюсного деления:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} = \frac{3,14 \times 19,5}{4} = 15,6 \text{ см.}$$

После определения величины τ определяют величину постоянной мощности C . Для данного случая по кривой рис. 1–4, $C = 2 \times 10^{-6}$ и мощность по формуле (1–35) будет:

$$P_2 = 2 \times 10^{-6} \times 19,5^2 \times 12,8 \times 1500 = 14,5 \text{ кВт.}$$

8. После определения мощности электродвигателя можно по кривой рис. 1–5 установить соответствие диаметра конца вала, равного 50 мм.

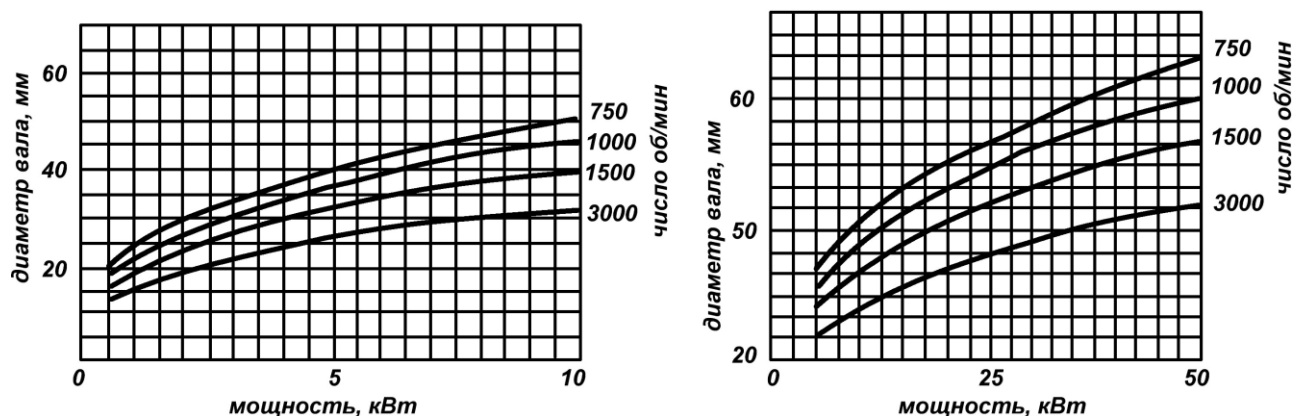


Рис. 1–5. График для приближенного определения допускаемой механической нагрузки на вал.

Пример 2. Электродвигатель защищенного исполнения без заводской обмотки и таблички, у которого внутренний диаметр расточки активной стали $Di = 350$ мм., длина активной стали $l = 210$ мм., высота стенки активной стали $ha = 45$ мм., число пазов $z = 72$, диаметр конца вала равен 80 мм. Требуется намотать его в восьмиполюсном исполнении, $2p = 8$.

Решение. Следует определить наименьшее число полюсов, приемлемое для статора электродвигателя с приведенными размерами:

$$2p = 0,5 \times \frac{Di}{ha} = 0,5 \times \frac{35}{2,5} = 3,9$$

или $2p = 4$. Полученное число полюсов меньше $2p = 8$, поэтому этот электродвигатель может быть выполнен с требуемым количеством полюсов, равным $2p = 8$. Для определения приблизительного количества витков в фазе, пользуясь для этого кривой рис. 1–3, необходимо предварительно определить площадь полюсного деления см. формулу (1–32):

$$Q\delta = \frac{\pi \times Di \times l}{2p} = \frac{3,14 \times 35 \times 21}{8} = 288 \text{ см}^2$$

По величине $Q\delta$ определяют число витков в фазе (см. рис. 1–3), где $w = 62$. Такое количество витков не делится на результат от деления $z/6 = 72/6 = 12$, поэтому число витков принимают равным $w = 60$. После определения числа витков необходимо определить величину индукции в спинке статора. Предварительно определяют сечение спинки статора:

$$Qa = la \times ha = 21 \times 4,5 = 94,5 \text{ см}^2$$

Определяют величину индукции:

$$Ba = \frac{0,5 \times 10^8}{Qa \times w} = \frac{0,5 \times 10^8}{94,5 \times 60} = 8800 \text{ гс} \quad (1 - 36)$$

Учитывая, что с ростом числа полюсов индукция в спинке статора уменьшается, а в воздушном зазоре увеличивается, для окончательного уточнения величины индукции в спинке активной стали статора следует предварительно проверить величину индукции в зазоре по формуле:

$$B\delta = \frac{1,57 \times 10^8}{Q\delta \times w_1} = \frac{1,57 \times 10^8}{288 \times 60} = 9100 \text{ гс}$$

Такая величина индукции не соответствует данным табл. 1–7, поэтому вместо $w = 60$ принимают $w = 72$ ($60 + 12$), и тогда по формуле (1–34) определяют новую величину индукции в воздушном зазоре:

$$B\delta = Ba \times \frac{w}{w_1} = 9100 \times \frac{60}{72} = 7550 \text{ гс}$$

что вполне допустимо; при этом индукция в спинке статора будет;

$$Ba = Ba \times \frac{w}{w_1} = 8800 \times \frac{60}{72} = 7350 \text{ гс}$$

Такая индукция в спинке занижена и электродвигатель мог быть выполнен с меньшим количеством полюсов. Электродвигатель при $2p = 8$ будет хорошо работать при недостаточном использовании активной стали спинки статора. Зная число витков в фазе, можно определить и число витков в секции. Для двухслойной обмотки с укороченным шагом число витков в секции будет:

$$w_c = \frac{72}{6 \times 2 \times 0,92} = 5,5$$

принимаем $w_c = 6$.

Для определения мощности электродвигателя необходимо предварительно определить величину τ :

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} = \frac{3,14 \times 35}{8} = 13,8 \text{ см.}$$

и по кривой рис. 1–4 определяют величину постоянной мощности $C = 2,5 \times 10^{-6}$. Мощность электродвигателя по формуле (1–35) равна:

$$P_2 = C \times Di^2 \times l \times n = 2,5 \times 10^{-6} \times 35^2 \times 21 \times 750 = 48,2 \text{ кВт}$$

Соответствие диаметра конца вала данной мощности проверяется по кривой рис. 1–5.

Пример 3. Определить приблизительную мощность электродвигателя нормального исполнения, число полюсов которого равно $2p = 4$, сечение обмоточного провода $S_{пр} = 3,3 \text{ мм}^2$, $U = 380 \text{ в}$, соединение фаз – звезда, $z_1 = 36$, число проводников в пазе $S_{п} = 22$, $\tau = 12,6 \text{ см}$. (полюсное деление)

Решение. По табл. 1–8, исходя из конструкции данного электродвигателя, определяют допустимую плотность тока:

$$\Delta_1 = 4,5 \text{ а/мм}^2.$$

Зная допустимую плотность тока и сечение обмоточного провода, можно определить и ток статора:

$$I_1 = 4,5 \times 3,3 = 14,8 \text{ а.}$$

Определяют линейную нагрузку А, которая равна:

$$A = \frac{z \times S_{\Pi} \times I_1}{2p \times \tau \times a} = \frac{36 \times 22 \times 14,8}{4 \times 12,6 \times 1} = \frac{11721,6}{50,4} = 233 \text{ а/см (1 – 37)}$$

что для данного типа электродвигателя находится в пределах норм. По формуле (1–9) определяют кажущуюся мощность:

$$P_s = \frac{\sqrt{3} \times U \times I}{1000} = \frac{1,73 \times 380 \times 14,8}{1000} = 9,73 \text{ кВа}$$

Определяя по табл. 1–2 значения $\cos\varphi = 0,86$ и $\eta = 86\%$, находят [по формуле (1–7)] полезную мощность электродвигателя:

$$P_2 = \frac{\sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \times \eta}{1000} = \frac{1,73 \times 380 \times 14,8 \times 0,86 \times 0,86}{1000} = 7,2 \text{ кВт}$$

1–9. Пересчет обмотки на другое напряжение.

Если переключением схемы обмоток получить нужное напряжение не удастся, обмотка электродвигателя должна быть вновь рассчитана, а статор перемотан по вновь полученным данным.

При пересчете необходимо учитывать следующее:

- 1) Магнитный поток не должен быть изменен или в случае особой необходимости может быть изменен не больше чем на 5%.
- 2) Объем тока в пазе должен оставаться без изменения или при надобности может быть изменен не больше чем на 5%.

Если при перемотке качество изоляции меняется на высший класс с применением специальных пропиточных лаков, поток и объем тока могут быть соответственно повышены. При соблюдении вышеприведенных условий обмотка статора перемотанного электродвигателя по новым данным будет работать в тех же условиях, что и до перемотки. Чтобы сохранить поток в новой обмотке на прежнем уровне, следует подобрать витки, исходя из равенства:

$$w_H = w'_{\text{СТ}} \times \frac{U_H}{U_C} \quad (1 - 38)$$

где: w_H – новое число витков; $w'_{\text{СТ}}$ – старое число витков; U_H – новое напряжение; $U_{\text{СТ}}$ – старое напряжение. Объем тока в пазе равен:

$$S_{\Pi} = \frac{I_{\Phi}}{a}$$

где: S_{Π} – число последовательно соединенных проводников в одном пазу; I_{Φ} – ток в фазе; a – число параллельных ветвей. Если при расчете электродвигателя на новое напряжение его мощность остается прежней, то величина тока будет меняться обратно пропорционально напряжению:

$$\frac{I_{\Phi H}}{I_{\Phi C}} = \frac{U_C}{U_H}$$

поэтому для сохранения объема тока в пазе необходимо:

$$S_{\text{пн}} = S_{\text{пс}} \times \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{с}}} \times \frac{a_{\text{н}}}{a_{\text{с}}} \quad (1 - 39)$$

полное число последовательно соединенных витков в фазе будет равно:

$$w_{\text{н}} = \frac{z_1 \times S_{\text{пн}}}{2m \times a_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad w_{\text{н}} = w_{\text{с}} \times \frac{S_{\text{пг}} \times a_{\text{с}}}{S_{\text{пс}} \times a_{\text{с}}} = w_{\text{с}} \times \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{с}}}$$

z_1 – число пазов; $S_{\text{пн}}$ – новое число последовательно соединенных проводников в одном пазу; m – число фаз. Таким образом, для сохранения магнитного потока на прежнем уровне необходимо, чтобы число эффективных проводников в пазе было изменено по формуле:

$$\frac{S_{\text{пн}}}{S_{\text{пс}}} = \frac{U_{\text{н}} \times a_{\text{н}}}{U_{\text{с}} \times a_{\text{с}}}$$

для предупреждения чрезмерного нагрева обмотки сечение меди параллельной ветви должно быть изменено так, чтобы плотность тока оставалась на прежнем уровне, если конструктивно класс изоляции обмотки не будет изменен. Если в основу принять старую плотность тока, то сечение нового провода определится по формуле:

$$q_{\text{н}} = q_{\text{с}} \times \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{н}}} \quad (1 - 40)$$

где: $q_{\text{н}}$ – сечение нового обмоточного провода, $q_{\text{с}}$ – сечение старого обмоточного провода.

Кроме того, при перемотке электродвигателей на другое напряжение с сохранением прежней мощности его ток изменится обратно пропорционально напряжению и будет:

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{с}} \times I_{\text{с}}}{U_{\text{н}}} \quad (1 - 41)$$

При расчете новой обмотки можно применить различные комбинации параллельных ветвей, сохранив при этом числа последовательно соединенных витков в фазе в соответствии с расчетом, так как это определяет напряжение, при котором электродвигатель должен работать, а выбор сечения обмоточного провода зависит от допустимой плотности тока для данного типа электродвигателя.

Пример 1. требуется перемотать обмотку статора электродвигателя напряжением 127/220 в, у которого обмотки фаз соединены треугольник/звезда (Δ/Y), напряжение 220/380 в. число пазов электродвигателя $z_1 = 36$, обмотка однослойная с числом катушек в фазе, равным шести, $n_{\text{к}} = 6$, катушечные группы соединены последовательно, число последовательно соединенных витков в фазе $w_{\text{ф}} = 132$, а в каждой катушке 22 витка, соединенных в две параллельные ветви, при диаметре обмоточного провода 1,56 мм. (сечение 1,91 мм²).

Решение. Для пересчета на другое напряжение необходимо определить число последовательно соединенных витков в фазе новой обмотки:

$$w_{\text{н}} = w_{\text{с}} \times \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{с}}} = 132 \times \frac{220}{127} = 228 \text{ витков}$$

Сечение обмоточного провода новой обмотки (при сохранении старой плотности тока):

$$q_H = q_C \times \frac{U_C}{U_H} = 2 \times 1,91 \times \frac{127}{220} = 2,2 \text{ мм}^2$$

где: 2 – число параллельных ветвей. Вместо двух параллельных ветвей сечением провода 2,2 мм² можно принять один провод диаметром 1,68 мм., сечением 2,22 мм², если он пройдет через шлиц паза. При такой замене старая обмотка может оставаться без изменения. Число витков в катушке определится по формуле:

$$\frac{w_H}{n_K} = \frac{228}{6} = 38$$

Пример 2. Требуется перемотать электродвигатель напряжением $U = 127/220$ в на напряжение $U = 220/380$ в. Обмотка двухслойная, соединение фаз треугольник – звезда (Δ/Y , число эффективных проводов в пазе $S_{\Pi} = 42$, число параллельных ветвей $a = 2$, диаметр обмоточного провода $d = 1,56/1,81$ мм. (сечение 1,91/2,58 мм²).

Решение. Для сохранения величины магнитного потока и объема тока в пазе число эффективных проводников в пазе при $a = 1$ следует определить по формуле:

$$S_{\Pi H} = S_{\Pi C} \times \frac{U_H \times a_H}{U_C \times a_C} = 42 \times \frac{380 \times 1}{220 \times 2} = 36,3$$

Так как число проводников в пазе S_{Π} должно быть целым и делиться на 2 (обмотка двухслойная), то величина $S_{\Pi H}$ принимается равной 36, что ведет к повышению магнитного потока приблизительно на 1% ($36,3/36 = 1,01$).

Сечение обмоточного провода новой обмотки определится по формуле:

$$q_H = q_C \times \frac{S_{\Pi C}}{S_{\Pi H}} = 1,91 \times \frac{42}{36} = 2,23 \text{ мм}^2$$

где: диаметр одинарного провода будет равен:

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times 2,23} = 1,68 \text{ мм}^2$$

Общее сечение меди в пазе при старой обмотке было:

$$S_{\Pi C} \times q_C = 42 \times 1,91 = 80,3 \text{ мм}^2$$

а при новой:

$$S_{\Pi H} \times q_H = 36 \times 2,23 = 80,4 \text{ мм}^2$$

Как видно из результатов подсчета, сечение меди в пазе как при старой обмотке, так и новой одинаковое. После проведенного подсчета можно проверить, как новая обмотка укладывается в паз. Общее сечение изолированной меди в пазе было:

$$S_{\Pi C} \times q_C = 42 \times 2,58 = 108,5 \text{ мм}^2$$

с сечением провода, равным $0,785 \times 1,81^2 = 2,58 \text{ мм}^2$, а при новой обмотке $q_H = 0,785 \times 1,93^2 = 2,93 \text{ мм}^2$, с общим сечением меди в пазе:

$$S_{\Pi H} \times q_H = 36 \times 2,93 = 105,5 \text{ мм}^2$$

Из произведенных подсчетов видно, что сечение меди (с изоляцией) в пазе при новой обмотке несколько меньше, поэтому и в отношении укладки в паз затруднений не будет.

Новую обмотку следует изготовить с числом катушек, равным старой обмотке с тем же шагом. Число эффективных витков в катушке должно быть $S_{\text{пн}}/2 = 36/2 = 18$, вместо $S_{\text{пс}}/2 = 42/2 = 21$, а диаметр провода 1,68/1,93 мм. вместо 1,56/1,81 мм. Катушечные группы должны быть соединены последовательно вместо двух параллельных ветвей в старой обмотке.

1–10. Пересчет асинхронных короткозамкнутых электродвигателей на другое число оборотов.

А. Если скорость вращения двухполюсного асинхронного электродвигателя равна:

$$n = \frac{f \times 60}{p} = \frac{50 \times 60}{1} = 3000 \text{ об. мин.}$$

где: f – частота; p – число пар полюсов, то скорость шестиполюсного электродвигателя будет:

$$n = \frac{f \times 60}{p} = \frac{50 \times 60}{3} = 1000 \text{ об. мин.}$$

Поэтому для изменения числа оборотов асинхронного электродвигателя (при неизменной частоте сети) следует изменить его число пар полюсов. При изменении числа пар полюсов у электродвигателя меняется и полюсное деление τ (см. формулу 1–23) и шаг обмотки $y_1 = z_1/2p$, где z_1 число пазов статора. Мощность электродвигателя P_2 с заданными размерами активной стали в соответствии с формулой (1–13):

$$P_2 = k \times A \times B_\delta \times n$$

Из приведенной формулы видно, что при пересчете электродвигателя на повышенное число оборотов его мощность может быть повышена (особенно это относится к электродвигателям старых серий, где активные материалы медь и сталь недостаточно использованы).

Если предположить, что индукция в воздушном зазоре B_δ и индукция в спинке статора B_a не изменены, то мощность электродвигателя при новых обмотках будет:

$$P_H = P_C \times \frac{n_H}{n_C} \quad (1 - 42)$$

где: P_H и n_H – соответственно мощность и число оборотов пересчитанного электродвигателя; P_C и n_C – мощность и число оборотов исходного электродвигателя.

Для сохранения индукции в воздушном зазоре при пересчете электродвигателя на пониженное число оборотов необходимо магнитный поток увеличить, при этом индукция в спинке стали статора B_a в некоторых электродвигателях может чрезмерно возрасти и вызвать их перегрев, поэтому в таких случаях необходимо предварительно проверить, находится ли индукция B_a в допустимых пределах. Индукцию в воздушном зазоре можно проверить по приближенной формуле (1–18):

$$B_\delta = 1,57 \times \frac{\Phi}{Q_\delta} \text{ Гс}$$

где: Q_δ – площадь полюсного деления, определяемое по формуле (1–32). Результат подсчета сопоставляют с табл. 1–7.

На практике встречаются асинхронные электродвигатели с почти предельными значениями электромагнитных нагрузок (A и B_δ).

Поэтому при пересчете электродвигателей на повышенные обороты увеличение их мощности часто ограничивается условиями перегрева их активных материалов. В таких случаях мощность электродвигателей следует оставлять прежней, если класс изоляции при этом не изменился.

Если же напряжение и схема соединения фаз остаются прежними, то величина тока, количество последовательно соединенных витков и сечение провода также остаются прежними.

Пусть требуется переделать электродвигатель, у которого $2p = 8$ на электродвигатель, у которого $2p = 4$. У указанного электродвигателя активные материалы полностью использованы, каждая фаза состоит из четырех катушечных групп ($n_k = p = 4$), соединенных последовательно, в каждой катушечной группе имеется по две катушки, а в каждой катушке по 16 витков.

В данном случае в каждой фазе сохраняется прежнее число последовательно соединенных витков и сечение провода, но вместо четырех катушечных групп в фазе по две катушки в каждой катушечной группе в соответствии с изменением числа полюсов будет две катушечные группы в фазе ($n_k = 2$) по четыре катушки в каждой катушечной группе. Шаг обмотки изменится в соответствии с новым числом полюсов, при этом мощность электродвигателя по вышеизложенным причинам останется прежней.

При уменьшении же числа оборотов электродвигателя мощность его уменьшится, при этом ток уменьшится в таком же соотношении, а при сохранении прежней плотности тока сечение провода также уменьшится. Только количество последовательно соединенных витков увеличится, исходя из соотношения старых чисел оборотов к новым. Если электродвигатель со скоростью вращения 1500 об./мин. ($2p = 4$) переделать на 1000 об./мин. ($2p = 6$), то количество последовательно соединенных витков будет:

$$w_H = \frac{n_C}{n_H} \times w_C$$

где: n_C и n_H – число оборотов старой и вновь пересчитанной обмоток; w_C – число последовательно соединенных витков исходного электродвигателя.

Сечение обмоточного провода при сохранении прежней плотности тока

$$q_H = \frac{n_C}{n_H} \times q_C$$

где: q_H – сечение нового обмоточного провода; q_C – сечение старого обмоточного провода. Магнитный поток в спинке стали статора уменьшится, так как:

$$Ba = 0,6 \times \frac{B\delta \times Di}{p \times ha} \quad (1 - 43)$$

где: при 1500 об./мин., $p = 2$, а при 1000 об./мин. $p = 3$. По этим же соображениям уменьшится и полюсное деление τ .

Индукция в воздушном зазоре, исходя из приближенной формулы:

$$B\delta = \frac{2,5 \times U_\Phi \times p \times 10^{-6}}{Di \times l \times z \times w_H} \quad (1 - 44)$$

не изменится, так как p и w_H увеличены в одно и то же число раз, и новая мощность электродвигателя определится по формуле (1-42):

$$P_H = P_C \times \frac{n_H}{n_C}$$

Соответственно изменению количества полюсов меняется шаг обмотки и количество катушечных групп в фазе. Таким образом, при пересчете электродвигателя с большего числа оборотов на меньшее при неизменности напряжения и соединения фаз следует изменить, т. е. увеличить только число последовательно соединенных витков каждой фазы. Помимо изложенного, при пересчете электродвигателей на другое число оборотов следует также учесть, что:

1. Повышение числа оборотов электродвигателя несколько увеличивает нагрев подшипников, что можно проверить, пользуясь формулами:

$$\Delta P_\tau = 5 \times 5 \times l_z \times v_z^2 \times \sqrt{\frac{P}{n}} \quad - \text{ для подшипников скольжения}$$

$$\Delta P_\tau = 0,015 \times \frac{D_z}{D_o} \times \sqrt{v_z} \quad - \text{ для подшипников качения}$$

где:

ΔP_τ – потери на трение, *вт*.

l_z – длина цапфы, *см*;

v_z – окружная скорость цапфы, *м/сек*.

D_z – нагрузка на кольцах шарикового подшипника, *кг*;

D_o – диаметр круга, взятого по центру шарика, *см*.

2. При пересчете электродвигателя, особенно на пониженные числа оборотов, следует проверить достаточность момента, учитывая, что номинальный момент изменяется в соответствии с формулой:

$$M_H = 0,975 \times \frac{P}{n}$$

3. При увеличении числа оборотов длина вылета лобовых частей из-за увеличения шага увеличивается, поэтому необходимо проверить расстояние от конца лобовой части до щита электродвигателя, дабы обеспечить соответствующий зазор, необходимый для данного напряжения электродвигателя.

4. При уменьшении числа оборотов в минуту охлаждение электродвигателя вентиляцией ухудшается, так как количество воздуха, прогоняемого вентилятором, пропорционально оборотам.

5. При выполнении обмотки электродвигателя круглым проводом для облегчения обмоточных работ необходимо диаметр проводников выбирать таким, чтобы он проходил через шлиц.

Например.

Требуется пересчитать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 5,8 *квт*, $2p = 8$, $U = 500$ *в*, $I_1 = 10,6$ *а* для работы при $2p = 6$, со степенью загрузки активных материалов, дающей возможность повысить его мощность.

Данные электродвигателя:

D_a – внешний диаметр статора 356 *мм*;

D_i – диаметр расточки статора 235 *мм*;

l – длина активной стали 135 мм;
 z_1 – число пазов статора 48;
 w_{Π} – число витков в пазе 29;
 d – диаметр и сечение меди провода, 1,81 мм, $q_c = \pi \times d^2 / 4 = 2,58 \text{ мм}^2$
 a_1 – количество параллельных ветвей 1;
 Δ_1 – допускаемая плотность тока, равная 4,1 а/мм²;
 y_1 – шаг обмотки, равный 1 – 6;
 A – линейная нагрузка, равная 200 а/см;
 h_z – высота зубца, равная 2,0 см.;

Решение.

1. По табл. 1–2 определяют к. п. д. и $\cos\varphi$ для данного электродвигателя: $\eta = 0,82$; $\cos\varphi = 0,72$

2. Определяют мощность электродвигателя при 1000 об. мин. ($2p = 6$):

$$P_H = \frac{n_H}{n_C} \times P_C = \frac{1000}{750} \times 5,8 \approx 7,75 \text{ кВт}$$

3. Находят величину фазного тока при $n_H = 1000$ об. мин.

$$I_\Phi = \frac{P_H \times 10^3}{\sqrt{3} \times U_L \times \eta \times \cos\varphi} = \frac{7,75 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 500 \times 0,82 \times 0,72} = 15,2 \text{ а}$$

При соединении фаз в звезду: $I_\Phi = I_L$

4. Определяют число витков в пазе:

$$w_H = w_C \times \frac{n_C}{n_H} = 29 \times \frac{750}{1000} = 21,6 \text{ принимается } w_H = 22$$

5. Определяют площадь поперечного сечения меди провода:

$$q_H = q_C \times \frac{w_C}{w_H} = 2,58 \times \frac{29}{22} = 3,4 \text{ мм}^2$$

Выбирают по ГОСТ сечение меди 3,2 мм² с диаметром провода 2,02 мм.

6. Определяют плотность тока а/мм²:

$$\Delta_1 = \frac{I_\Phi}{q_H} = 4,75$$

и сопоставляют с табл. 1–8.

7. Определяют линейную нагрузку а/см.:

$$A = \frac{I_\Phi \times w}{a_1 \times t_1} = \frac{15,2 \times 22}{1 \times 1,54} = 217$$

где:

$$t_1 = \frac{\pi \times D_i}{z_1} = \frac{3,14 \times 23,5}{48} = 1,54 \text{ см (1 – 45)}$$

8. Проверяют допустимый перегрев, исходя из того, что произведение $A \times \Delta_1$ пропорционально перегреву:

$$A \times \Delta_1 \leq 1000 - 2000.$$

В данном случае $A \times \Delta_1 = 217 \times 4,75 = 1023$, что находится в пределах допустимого.

9. Определяется максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре:

$$B\delta = \frac{2,5 \times U_{\phi} \times p \times 10^{-6}}{Di \times l \times z \times w_H} = \frac{2,5 \times 289 \times 3 \times 10^{-6}}{235 \times 135 \times 48 \times 22} = 6500 \text{ гс}$$

что в соответствии с табл. 1-7 находится в пределах допустимого.

10. Определяют магнитную индукцию в спинке статора:

$$Ba = 0,6 \times \frac{B\delta \times Di}{p \times ha} = 0,6 \times \frac{6500 \times 235}{3 \times 4,05} = 7650 \text{ гс}$$

здесь:

$$ha = \frac{Da - Di}{2} - hz$$

где: ha – высота спинки статора, см., hz – высота зубца статора, см.

Таким образом, повышение мощности электродвигателя вполне допустимо.

1-11. Поверочный расчет нормального асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Данные электродвигателя: мощность 10 кВт, 220/380 в, $2p = 4$, $z = 36$ коэффициент полезного действия $\eta = 0,87$, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,88$ (данные и $\cos\varphi$ определены по табл. 1-2).

Зная мощность электродвигателя на его валу, определяют и потребляемую мощность от сети (расчетная мощность):

$$P_c = \frac{P_H}{\eta \times \cos\varphi} = \frac{10}{0,87 \times 0,88} = 13,1 \text{ кВа}$$

Размеры статора снимают с натуры и заносят в журнал:

Da – наружный диаметр активной стали статора 262 мм.

Di – внутренний диаметр активной стали статора 175 мм.

l – длина активной стали статора 145 мм.

Для определения числа эффективных проводов в пазе необходимо рассчитать величины зубцового деления линейной нагрузки A и номинального фазного тока:

$$t_1 = \frac{\pi \times Di}{z_1} = \frac{3,14 \times 17,5}{30} = 1,525 \text{ см.}$$

Величину линейной нагрузки выбирают по кривой рис. 1-2, где $A = 250 \text{ а/см.}$

$$I_{\phi} = \frac{P_s \times 10^4}{m \times U} = \frac{13,1}{3 \times 220} = 19,8 \text{ а}$$

Число эффективных проводников в пазе при числе параллельных ветвей $a = 2$ определяется по формуле:

$$w_{\text{эфф}} = \frac{A \times t_1 \times a}{I_{\phi}} = \frac{250 \times 1,525 \times 2}{19,8} = 38$$

Сечение и диаметр обмоточного провода подсчитывают, исходя из допустимой плотности тока (см. табл. 1–8). Для данного типа электродвигателя:

$$\Delta_1 = 6 \text{ а/мм}^2 \text{ и } d = 1,45 \text{ мм., а с изоляцией } d_{\text{из}} = 1,76 \text{ мм.}$$

Площадь сечения паза $Q_{\text{п}}$ определяют по снятым размерам по табл. 1–6 и равна 162 мм^2 . Размеры пазовой изоляции определяют по таблице, а коэффициент заполнения паза по формуле:

$$k_{\text{п}} = \frac{w_{\text{эфф}} \times d_{\text{из}}^2}{q_{\text{п}}} = \frac{38 \times 1,76^2}{162} = 0,727 \quad (1 - 47)$$

Для определения числа витков на фазу и шага обмотки необходимо определить число пазов на полюсе и фазу:

$$q_1 = \frac{z_1}{m \times 2p} = \frac{36}{3 \times 4} = 3$$

Число витков фазы:

$$w_{\text{ф}} = p \times q_1 \times \frac{w_{\text{эфф}}}{a} = 2 \times 3 \times \frac{38}{2} = 114 \quad (1 - 48)$$

Шаг обмотки принимается, учитывая размер его сокращения:

$$y = 0,8 \times \tau$$

где: τ – определяется по формуле (1-23):

$$y = 0,8 \times 13 \approx 10$$

Принимается $y_y = 10$ и коэффициент укорочения будет:

(здесь и далее в этом примере автором не верно подсчитан коэффициент укорочения и коэффициент обмотки соответственно – примечание составителя)

$$\frac{y_y}{y_p} = \frac{10}{13} = 0,77$$

Такой коэффициент укорочения вполне приемлем так как его величина больше 0,7.

Электрический угол между э. д. с. двух соседних секций катушки определяют по формуле:

$$a = \frac{360}{z} \times p \quad (1 - 49)$$

Для данного случая $a = 360/36 \times 2 = 20^\circ$. Коэффициент распределения определится по формуле:

$$k_p = \frac{\sin \times \frac{q_1 \times a}{2}}{q_1 \times \sin \times \frac{a}{2}} \quad (1 - 50)$$

Для данного случая коэффициент распределения:

$$k_p = \frac{\sin \times \frac{q_1 \times a}{2}}{q_1 \times \sin \times \frac{a}{2}} = \frac{\sin \times \frac{3 \times 20}{2}}{3 \times \sin \times \frac{20}{2}} = \frac{\sin 30^\circ}{3 \times \sin 10^\circ} = \frac{0,5}{3 \times 0,174} = 0,957$$

а величина обмоточного коэффициента:

$$k_o = k_y \times k_p = 0,77 \times 0,957 = 0,743 \quad (1 - 51)$$

По выбранному сечению витка проверяют возможность укладки требуемого количества витков в паз. Проверку можно выполнить, подсчитав сечение паза (см. табл. 1–6) и определив занимаемую в пазе площадь витковой изоляцией, воздушными прослойками и обмоточной медью. Проверить также можно методом предварительной укладки в паз требуемого количества проводников соответствующего сечения, количество которых должно равняться числу витков в пазе. Если сечение проводника слишком велико, что может вызвать затруднение при его укладке в паз, или проводника с таким сечением не окажется, взамен проводника одного сечения можно принять два проводника меньшего сечения (см. табл. 6–15), соединив их параллельно, при этом суммарное сечение этих проводников должно быть равным сечению заменяемого провода. Перед заменой проводов следует проверить возможность укладки в паз нового количества проводников.

1–12. Пересоединение обмоток асинхронных электродвигателей для новых условий работы.

В асинхронных электродвигателях число последовательно соединенных витков фазы получается, как произведение числа витков одной катушки на число катушек полюсно-фазной группы и на число полюсно-фазных групп каждой фазы, а скорость вращения электродвигателя определяется числом полюсов при частоте питающей сети, равной 50 гц. Если обмотка электродвигателя переключается для новых условий работы, то это осуществимо при изменении одной или нескольких из приведенных выше величин. Если предположить, что требуется в 2 раза уменьшить напряжение электродвигателя, то для этого достаточно число параллельных ветвей увеличить в 2 раза, вследствие чего количество последовательно соединенных витков уменьшится в 2 раза, и т. д. Если обмотка электродвигателя изменяется для новых условий работы, необходимо предусмотреть, чтобы при каждом увеличении тока его плотность в проводнике не выходила за пределы допустимой величины, так как сечение проводника определяется величиной тока и допустимой плотностью (см. табл. 1–8).

Мощность электродвигателя определяется формулой:

$$P = \frac{Mn}{975} \quad \text{кВт}$$

где: M – вращающий момент, $\text{кг}\cdot\text{м}$, n – число оборотов в минуту; 975 – постоянная величина.

а) Переключение статорной обмотки на другое число полюсов.

При присоединении схемы статорной обмотки для работы электродвигателя с другой скоростью вращения следует соответственно изменить число полюсов обмотки. При переключении статорной обмотки на большее число полюсов следует учитывать, что обмотка, выполненная для определенного числа полюсов, имеет ширину катушки, соответствующую данному полюсному делению. При изменении числа полюсов изменяется и полюсное деление, при этом ширина катушки остается прежней.

Поэтому отношение ширины катушки к полюсному делению, т. е. коэффициент укорочения пересоединенной обмотки, будет отличаться от соответствующих значений первоначальной обмотки. Так как коэффициент укорочения определяет и число эффективных витков фазы, очевидно, что пересоединенная обмотка будет иметь значительно меньшее число эффективных витков, чем первоначальная.

Кроме того, электродвигатель, рассчитанный для работы при определенном числе полюсов, имеет определенное значение потока на полюс и индукцию в воздушном зазоре и спинке статора.

При переключении схемы обмотки на другое число полюсов индукция в воздушном зазоре приблизительно останется прежней, а поток на полюс изменится приблизительно обратно пропорционально числу полюсов. Если, например, электродвигатель с $2p = 4$ переключить на $2p = 8$, то поток на полюс будет приблизительно равен половине. Различие чисел эффективных витков на фазу и различие потока на полюс вызывают необходимость изменения подводимого к пересоединенной обмотке напряжения.

Пример. Электродвигатель, у которого $P = 100$ квт, $U = 220$ в, $z = 48$, $q = 4$, $2p = 4$, укороченный шаг $y = 10$ (вместо 12), с отношением ширины катушки полюсному делению равным:

$$\frac{y}{\tau} = \frac{10}{12} = 0,833$$

при его пересоединении на $2p = 6$ число пазов на полюс и фазу будет равно:

$$\frac{z}{2p} = \frac{48}{6} = 8$$

а отношение ширины катушки к полюсному делению:

$$\frac{y}{\tau} = \frac{10}{8} = 1,25$$

Коэффициент укорочения обмотки при $2p = 4$ равен 0,966, а коэффициент укорочения при $2p = 6$ равен 0,924, где отношение ширины катушки к первоначальному полюсному делению будет равно $8/12 = 2/3$.

Если поток при $2p = 4$ принять за единицу, то произведение потока на коэффициент укорочения в первом случае будет равен $1 \times 0,966 = 0,966$, а во втором случае равен $2/3 \times 0,966 = 0,616$. Если при $2p = 4$ напряжение $U = 220$ в, то при $2p = 6$ напряжение должно равняться $(0,616/0,966) \times 220 = 140$ в.

Таким образом, электродвигатель при его переключении на $2p = 6$ вместо $2p = 4$ должен подключаться к сети с напряжением 140 в.

В отдельных случаях при переключении обмоток на большее число полюсов для увеличения пускового или максимального момента потребуется некоторое повышение напряжения против расчетного, а при переключении на меньшее число полюсов – понижение напряжения во избежание чрезмерного роста индукции в спинке статора. Если при переключении обмотки статора на большее число полюсов значение коэффициента укорочения получится ниже 0,7, то такое переключение не рекомендуется выполнять, так как оно может привести не только к уменьшению мощности, но и к искажению распределения индукции в воздушном зазоре, а в процессе пуска и его работы – к появлению чрезмерного гудения.

б) Пересоединение схемы статорных обмоток для работы при другом напряжении.

При переключении обмоток электродвигателя для работы на другое напряжение, отличное от его паспортных данных, следует исходить из того, что эффективное значение э. д. с., индуктированной в одной фазе обмотки статора, определяется по формуле:

$$E_1 = 4,44 \times k_1 \times f \times w_1 \times \Phi \times 10^{-8} \text{ [В]} \quad (1 - 52)$$

где: f – частота, $гц$, w_1 – число последовательно соединенных витков одной фазы обмотки статора; Φ – поток одного полюса, $мкс.$, k_1 – обмоточный коэффициент, меньше единицы.

Примечание. Обмоточный коэффициент учитывает уменьшение э. д. с. в связи с тем, что э. д. с. отдельных катушек сдвинуты по фазе друг относительно друга. Этот коэффициент также учитывает уменьшение э. д. с. в обмотках с укороченным шагом, так как в этом случае поток, охватывающий виток, будет меньше, чем при диаметральном шаге.

Величину k_1 можно приближенно принять равной 0,96 для обмоток с диаметральным шагом и 0,90 для обмоток с укороченным шагом.

При переключении схемы обмотки или перемотке электродвигателя на другое напряжение, сохранив при этом схему соединения фаз и его число оборотов в минуту, следует число последовательно соединенных витков в фазе изменить (увеличить или уменьшить) в том же соответствии, в каком изменяется величина напряжения обмотки электродвигателя. Новое число витков следует подобрать, исходя из равенства:

$$w_H = w_C \times \frac{U_H}{U_C}$$

где: w_H – новое число последовательно соединенных витков; w_C – старое число последовательно соединенных витков; U_H – новое напряжение; U_C – старое напряжение.

В отдельных случаях схема обмотки статора может быть переключена на другое напряжение методом переключения катушечных групп или катушек вместо последовательного соединения на параллельное или наоборот в зависимости от напряжения, при котором электродвигатель должен работать. Таким образом, переключение схемы статорной обмотки для работы при меньшем напряжении против номинального может быть осуществлено переключением обмоток (без перемотки), если в статорной обмотке имеются катушечные группы или катушки, соединенные последовательно. Уменьшение напряжения при этом зависит от количества получающихся параллельных ветвей обмотки три условия одинаковости числа витков в каждой параллельной ветви.

При параллельном соединении катушечных групп или катушек суммарное сечение проводов параллельных ветвей каждой фазы получится увеличенным во столько раз, во сколько увеличено число параллельных ветвей, при этом величина тока также увеличится во столько же раз.

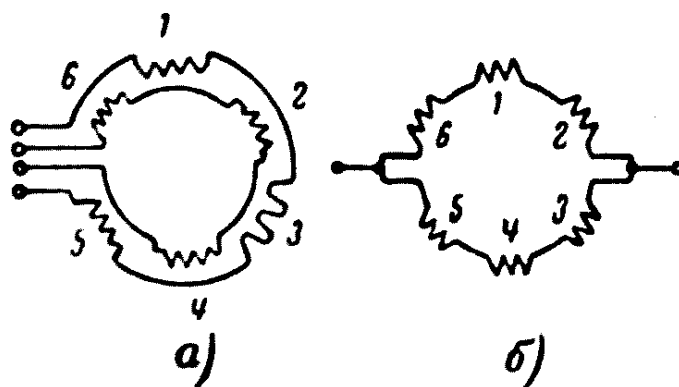


Рис. 1–6. Распределение параллельных ветвей обмотки. а – правильно, б – неправильно.

При переключении обмотки статора на большее число параллельных ветвей необходимо ветви равномерно распределить по всей окружности статора, не сосредоточивая их в одной части окружности (рис. 1–6, а). При соединении схемы по рис. 1–6, б возможно – появление уравнивающих токов в параллельных ветвях и повышение гудения электродвигателя.

Увеличить напряжение против номинального методом переключения схемы обмоток возможно только при наличии в схеме обмотки параллельных ветвей. Степень увеличения напряжения зависит от возможного увеличения числа последовательно соединенных витков каждой фазы.

При переключении обмоток фаз на последовательное соединение номинальный ток электродвигателя уменьшится во столько раз, во сколько раз будет увеличено число последовательно соединенных витков в каждой фазе при неизменном соединении фаз. При фазном роторе переключение на другое напряжение при неизменном числе оборотов в минуту производится только в обмотке статора, а обмотка ротора в переключении не нуждается, так как напряжение на контактных кольцах ротора при этом остается неизменным.

Если для изменения напряжения число витков обмотки статора будет изменено против расчетных, магнитный поток, а, следовательно, и индукция также изменятся. Чтобы не перегружать в таких случаях активную сталь статора, до переключения последовательно соединенных витков на меньшее число следует проверить величину потока, которая получится после переключения. При переключении схемы обмоток на другое напряжение линейная нагрузка A не изменится при условии, если произведение числа проводников в пазе на ток также не изменится. Если при переключении схемы обмотки на меньшее число последовательно соединенных витков активная сталь статора окажется перегруженной по потоку, необходимо соответственно снизить мощность электродвигателя. При перемотке на другое напряжение могут иметь место случаи, когда расчетное число витков при сохранении прежней плотности тока не размещается в пазе вследствие изменения коэффициента заполнения паза в связи с изменением сечения обмоточного провода.

В этих случаях следует сечение обмоточной меди уменьшить, уменьшив соответственно и мощность электродвигателя. Если при перемотке мощность должна быть сохранена, коэффициент заполнения паза можно сохранить или даже увеличить за счет применения обмоточного провода ПЭВ–2 и синтоленты – для пазовой изоляции.

Пример 1. Электродвигатель мощностью 10 кВт., $U = 500$ в., $I = 16,5$ а., $n = 720$ об. мин., соединение обмоток фаз "звезда", в каждой фазе восемь катушечных групп, обмотка двухслойная. Требуется переключить на другое напряжение.

Решение.

Для переключения электродвигателя на другое напряжение можно прибегнуть к разным методам:

1. Соединения обмоток фаз переключить вместо звезды на треугольник, где величина напряжения будет:

$$U = \frac{500}{\sqrt{3}} = \frac{500}{1,73} = 289 \text{ в}$$

2. Методом переключения восьми последовательно соединенных катушечных групп, переключив их на две параллельные ветви по четыре последовательно соединенные катушечные группы в каждой параллельной ветви; напряжение (при прежнем соединении фаз) будет:

$$U = \frac{500}{2} = 250 \text{ в}$$

3. Методом переключения восьми последовательно соединенных катушечных групп в четыре параллельные ветви по две катушечные группы в каждой ветви при старом соединении фаз и напряжении:

$$U = \frac{500}{4} = 125 \text{ в}$$

Пример 2. Электродвигатель мощностью 14 *квт*, 500 *в*, 970 *об. мин.*, с однослойной обмоткой, соединение "звезда"; в каждой фазе три катушечные группы, соединенные последовательно, а в каждой группе четыре катушки. Требуется переключить обмотку на 220 *в*.

Решение.

Для переключения на напряжение 220 *в* можно обмотку каждой фазы переключить на две параллельные ветви, для чего в каждой параллельной ветви будет по одной целой и одной половине катушечной группы, где половина состоит из двух катушек.

После такого переключения напряжение обмотки равно:

$$U = \frac{500}{2} = 250 \text{ в}, \quad \text{мощность: } P = 14 \times \frac{220}{250} = 12,3 \text{ квт.}$$

Пример 3. Электродвигатель мощностью 40 *квт*, 220 *в*, 1470 *об. мин.*, с двухслойной обмоткой; каждая фаза состоит из четырех катушечных групп, а в каждой группе по четыре катушки. Катушечные группы соединены в две параллельные ветви по две катушечные группы в каждой параллельной ветви при соединении фаз в звезду. Требуется обмотку переключить на 500 *в*.

Решение.

Если две параллельные ветви каждой фазы переключить с параллельного их соединения на последовательное, напряжение статорной обмотки изменится и будет равно 440 *в* (220×2). Фактически напряжение сети, к которой электродвигатель подключается, равно 500 *в*, что по величине индукции может вызвать перегрузку активной стали статора. Для электродвигателей старых серий, где активная сталь относительно слабо использована, такое переключение принципиально возможно, но требует проверки.

При таком переключении мощность электродвигателя может возрасти на отношение 500/440 = 1,14 его номинальной паспортной мощности.

Для большей уверенности в возможности перегрузки электродвигателя после переключения обмотки его следует испытать под нагрузкой. Переключение обмотки электродвигателя с 500 на 380 *в* может быть осуществлено комбинационным путем.

1. Катушки каждой фазы делят на две равные части, из которых одни половины катушек всех фаз соединяют в треугольник, а другие присоединяют к соответствующим вершинам треугольника (рис. 1–7).

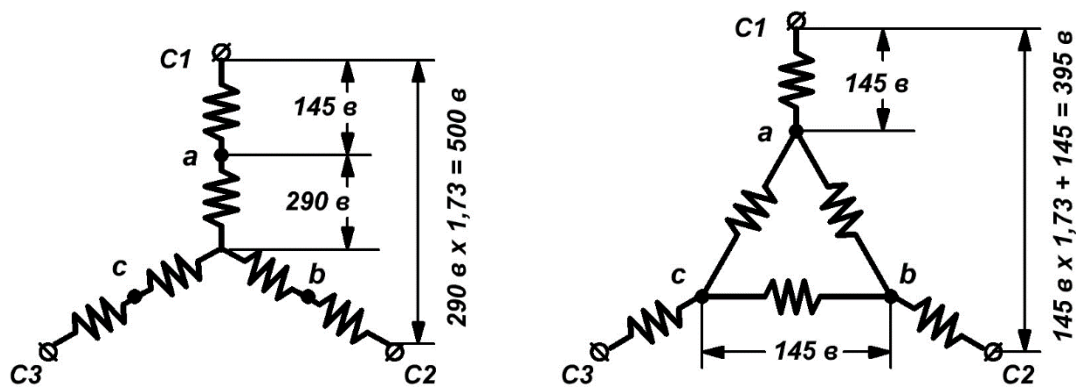


Рис. 1-7. Переключение статорной обмотки на 380 в вместо 500 в.

При такой схеме соединения к частям обмотки, соединенным треугольником (а-б, б-с, с-а), должно быть подведено напряжение, равное 145 в, а ко вторым частям обмотки (а-с₁, б-с₂ и с-с₃) – напряжение, равное $145 \times \sqrt{3} = 250$ в. Таким образом, при таком пересоединении обмотки для сохранения параметров электродвигателя к его обмотке должно быть подведено напряжение, равное $145 + 250 = 395$ в.

Таким образом, подведенное к электродвигателю напряжение 380 в на 4% ниже требуемого после переключения схемы обмотки, что ведет к снижению мощности электродвигателя. Однако окончательно мощность определится после испытания электродвигателя под нагрузкой.

1-13. Определение размеров обмоток.

Определение длины лобовых частей полувитка и длины вылета. Для двухслойных обмоток из мягких секций средняя длина полувитка и длины лобовых частей равна:

$$l_{CP} = l_1 + l_L \quad (1 - 53)$$

где: l_1 – длина активной стали статора; l_L – длина лобовой части, которая состоит из двух отогнутых участков и двух прямолинейных участков, служащих продолжением пазовой части обмотки. Длина прямолинейной части зависит от мощности электродвигателя. Среднюю ширину τ секции по пазам можно определить по дуге окружности, проходящей через середины этих пазов и имеющей диаметр, равный сумме внутреннего диаметра статора Di и высоты его паза h_{II} :

$$\tau_y = \frac{\pi \times (Di + h_{II})}{2p} \times \beta \quad (1 - 54)$$

где:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{\text{шаг обмотки}}{\text{полюсное деление}}$$

Значения k и L определяются по табл. 1-11.

Электродвигатели мощностью до 10 – 14 кВт при $2p = 2$ и 4 выполняются с обмоткой, заложенной в пазы сердечника статора до запрессовки пакета в корпус.

Таблица 1-11 Значения величин k и l .

$2p$	Сердечник обматывается до запрессовки в корпус		Сердечник обматывается после запрессовки	
	k	$L, \text{см.}$	k	$L, \text{см.}$
2	1,25	2	1,30	3
4	1,30	2	1,35	3
6	1,40	2	1,45	3
8	1,50	2	1,55	3

Длина вылета лобовой части T приближенно может быть определена формулой:

$$T \approx 0,5 \times \sqrt{l_y^2 - \tau_y^2}$$

Для однослойной и цепной обмотки длина лобовой части l_l и вылет T могут быть определены по этим же равенствам, но величины k и L следует брать на 10–15% больше, чем для двухслойных.

Пример. Определение средней длины витка для статорной обмотки $2p = 4, z = 36, Di = 160$ мм., полная длина активной стали статора $l_{\Pi} = 150$ мм., высота паза $h_{\Pi} = 23$ мм.

Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{m \times 2p} = \frac{36}{3 \times 4} = 3$$

Шаг обмотки принимается равным $0,8 \times \tau$:

$$y \approx 2,4 \times q = 2,4 \times 3 = 7,2 \approx 7$$

Средняя ширина секции:

$$T_{\text{ш}} = \frac{\pi \times (Di + h_{\Pi}) \times y}{z} = \frac{3,14 \times (16 + 2,3) \times 7}{36} = 11,1 \text{ см. (1 – 55)}$$

Величины k и l определяются по таблице 1-11 для сердечника, который запрессован в корпус до намотки (электродвигатель ремонтируется):

$$k = 1,35; L = 2 \text{ см.}$$

откуда

$$l_l = k \times T + L = 1,35 \times 11,1 + 2 = 17 \text{ см. (1 – 56)}$$

Определяется средняя длина витка:

$$l_{\text{в}} = 2 \times (l_{\Pi} + l_l) = 2 \times (15 + 17) = 64 \text{ см. (1 – 57)}$$

2. Обмотка цепная.

Шаг обмотки y принимается равным 9. Величины по табл. 1-11 $k = 1,1 \times 1,35 = 1,50; L = 1,1 \times 2 = 2,2$ (величины k и L взяты на 10% больше). Средняя ширина секции по формуле 1-55:

$$T_{\text{ш}} = \frac{\pi \times (Di + h_{\Pi}) \times y}{z} = \frac{3,14 \times (16 + 2,3) \times 9}{36} = 14,4 \text{ см.}$$

Длина лобовой части по формуле 1-56:

$$l_{\text{л}} = 1,5 \times 14,1 + 2,2 = 23,8 \text{ см.}$$

3. Обмотка катушечная.

Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} = \frac{3,14 \times 16}{4} = 12,6 \text{ см.}$$

Длина лобовой части (предварительная):

$$l_{\text{л}} \approx 1,4 \times \tau + \sigma \text{ см. (1 - 58)}$$

где: величина σ в зависимости от размеров электродвигателя и его напряжения колеблется от 2 до 10. В данном случае размеры электродвигателя невелики и σ принимается в размере 4. Тогда:

$$l_{\text{л}} \approx 1,4 \times 12,6 + 4 = 21,7 \text{ см.}$$

1-14. Пересчет электродвигателей с фазным ротором на короткозамкнутый.

В практике модернизации электродвигателей часто приходится переконструировать фазные электродвигатели в короткозамкнутые как более удобные и более надежные в эксплуатации. При пересчетах таких электродвигателей предполагается, что:

- 1) мощность электродвигателя после переделки остается неизменной;
- 2) число оборотов (синхронное) сохраняется;
- 3) обмотка статора не реконструируется, а остается прежней;
- 4) потери в меди обмотки ротора должны быть по возможности сохранены на прежнем уровне.

В связи с некоторым улучшением охлаждения короткозамкнутого ротора по сравнению с фазным можно допустить увеличение потерь в роторе на 10-15%. До пересчета следует предварительно проверить, допускает ли соотношение числа пазов и статоре z_1 и роторе z_2 проводить эту модернизацию, так как несоответствие соотношения чисел пазов статора и ротора может вызвать в работе электродвигателя прилипание стали ротора к стали статора, застревание во время пуска и ненормальное гудение при пуске и работе электродвигателя. Во избежание прилипания электродвигателя необходимо, чтобы:

- а) $z_2 \neq z_1$; б) $z_2 \neq \frac{1}{2} z_1$; в) $z_2 \neq 2z_1$;
- г) $z_2 \neq 2p(3i \pm 1)$ и д) $z_2 \neq 2p3i$, где i – любое целое число.

Во избежание застревания ротора при пуске необходимо, чтобы:

- а) $z_2 \neq z_1 \pm p$; б) $z_2 \neq z_1 \pm 2p$
- в) $z_2 \neq 0,5z_1 \pm p$; г) $z_2 \neq 2z_1 \pm 2p$

Для предупреждения появления ненормального гудения во время работы электродвигателя необходимо, чтобы:

- а) $z_2 \neq 2p_1 (3i \pm 1)$
- б) $z_2 \neq 2p3i \pm (2p_1 + 1)$

Ход расчета.

Проверяют: фазное напряжение статора; число эффективных проводников в пазе статора $S_{п1}$; линейную нагрузку, которая не должна превышать допустимых пределов (рис. 1–2), плотность тока в обмотке, которая не должна превышать допустимых пределов (табл. 1–8); максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре $B\delta$, зубцах на $\frac{1}{3}$ их высоты, спинке, которые не должны выходить за пределы допустимого (табл. 1–7).

Определяют: идеальный ток короткого замыкания ротора:

$$I_{ki} = \frac{6,4 \times \beta \delta \times l \times D_i}{C' \times S_{п1} \times z_1}$$

C' определяют из следующего уравнения:

$$C' = 13,9 \times \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right) \times l_0 + 2,1 \times l_K$$

где:

$$N_1 = \frac{z_1}{6p}; N_2 = \frac{z_2}{6p}; l_K = \frac{\pi \times D_K}{z_2} + 2m$$

D_K – средний диаметр короткозамыкающего кольца. m – расстояние между торцевой поверхностью пакета стали ротора и короткозамыкающим кольцом. Отношение идеального тока короткого замыкания к номинальному будет равно:

$$\frac{Ik_i}{I_H} = \alpha$$

В соответствии с требованиями эксплуатации отношение пускового момента электродвигателя к номинальному моменту $M_{п}/M_H = \beta$ (определяют по каталожным данным). Скольжение электродвигателя после его модернизации определяют из формулы:

$$S_0 = \frac{\beta}{\alpha^2}$$

Ток в стержне ротора определяется формулой:

$$I_{CT} = k_{рот} \times \frac{P_H \times 10^3}{z_2 \times U_2}$$

$k_{рот} \approx 1,15$; U_2 – напряжение ротора; z_2 – число пазов ротора; P_H – номинальная мощность электродвигателя. Ток в короткозамыкающем кольце:

$$I_K = I_{CT} \times \frac{1}{2 \times \sin \times \left(\frac{\pi \times p}{z_2} \right)}$$

Активное сопротивление ротора:

$$r = r_{CT} + \frac{2 \times r_K}{\Delta_2}$$

где:

$$\Delta_2 = 2 \times \sin \times \frac{\pi \times p}{z_2}$$

$$r_{\text{СТ}} = 1,24 \times \rho \times \frac{l_2}{S_{\text{СТ}}} \quad \text{сопротивление стержня ротора}$$

$$r_{\text{СТ}} = 1,24 \times \rho \times \frac{\pi \times D_{\text{К}}}{z_2 \times a \times b} \quad \text{сопротивление части кольца между соседними стержнями.}$$

a и b – высота и ширина кольца; ρ – удельное сопротивление материала, принимаемого для короткозамыкающего кольца клетки при 15°C.

$S_{\text{СТ}}$ – сечение стержня:

$$S_{\text{СТ}} = \frac{l_{\text{СТ}}}{\Delta_{\text{СТ}}} \quad \text{мм}^2$$

$\Delta_{\text{СТ}}$ – плотность тока, равная 5 – 8 а/мм² (бóльшая плотность берется для малых электродвигателей). Примечание. При выборе $\Delta_{\text{СТ}}$ необходимо считаться с условиями пуска электродвигателя и условиями охлаждения при его нормальной работе.

При тяжелых условиях пуска, то есть с большим маховым моментом приводимого механизма, а следовательно и длительностью его разбега, следует плотность тока брать не выше 6,5 а/мм², а для закрытых обдуваемых электродвигателей она принимается на 10 – 15% меньшей.

Длина стержня берется равной:

$$l_{\text{СТ}} = 1,12 \times l_{\text{СТ}}$$

Сечение короткозамыкающего кольца:

$$S_{\text{К}} = \frac{I_{\text{К}}}{\Delta_{\text{К}}}$$

где плотность тока $\Delta_{\text{К}}$ обычно меньше $\Delta_{\text{СТ}}$ на 20 – 40%.

Если плотность тока в стержнях или кольцах превышает допустимые пределы следует сечение короткозамкнутого кольца увеличить, а если этого нельзя выполнить по условиям размера паза, следует применить материал для кольца с меньшим удельным сопротивлением. Если (плотность тока подучилась малой по сравнению с необходимой для обеспечения пусковых характеристик, а уменьшить сечение стержня нельзя (по условиям размера паза), следует выбирать материал для стержней и колец с большим удельным сопротивлением.

1–15. Расчет обмоток однофазного электродвигателя (переделывается из трехфазного).

Расчет рабочей и вспомогательной обмоток однофазного электродвигателя с короткозамкнутым ротором производится по обычному методу расчета трехфазных асинхронных электродвигателей.

Для получения требуемых для расчета числа витков необходимо предварительно определить отдельные размеры статора, а именно: внутренний диаметр активной стали и ее длину. Площадь полюсного деления $Q\delta$ определяют по формуле (1–32):

$$Q\delta = \frac{\pi \times D_i \times l}{2p} \quad \text{см}^2$$

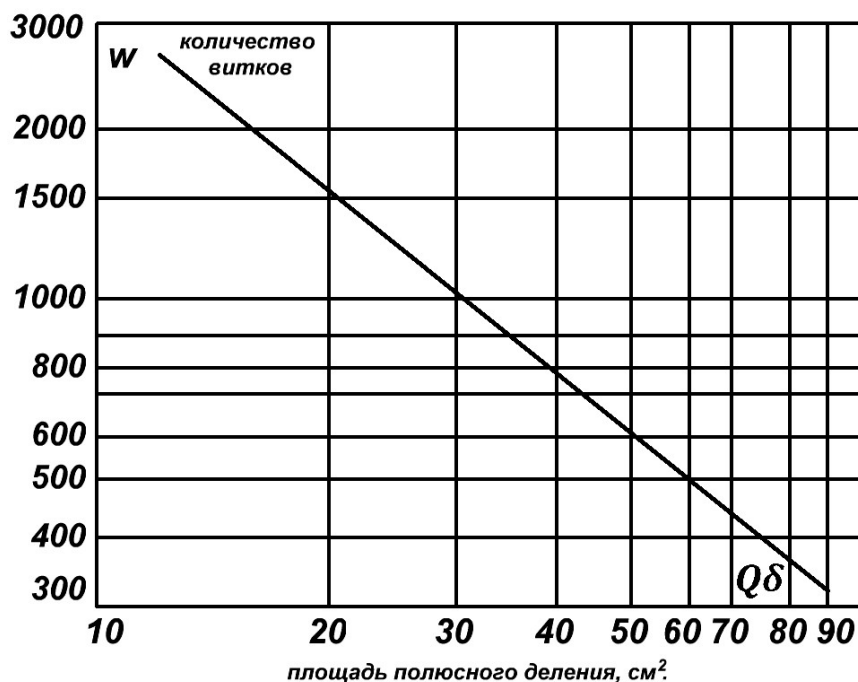


Рис. 1–8. Кривая для определения числа последовательно соединенных витков w рабочей обмотки в зависимости от площади полюсного деления однофазного электродвигателя.

Зная площадь полюсного деления по рис. 1–8, определяют число последовательно соединенных витков рабочей обмотки. Зная число витков рабочей обмотки, определяют и число эффективных проводников на один паз по формуле:

$$w_{\text{эфф}} = \frac{3 \times w}{\frac{2}{3} \times z}$$

где: z – число пазов статора, а рабочая обмотка однофазного электродвигателя занимает $\frac{2}{3}$ числа пазов. При известной величине тока электродвигателя, равной приблизительно половине величины трехфазного, исходя из допустимой плотности тока (см. табл. 1–8), определяют сечение проводника:

$$q_{\Pi} = \frac{I}{\Delta}$$

Пусковая обмотка занимает $\frac{1}{3}$ числа пазов статора, а сечение ее проводников вдвое меньше сечения проводников рабочей обмотки, поэтому и число проводников в пазах будет в 2 раза больше. Шаги рабочей и пусковой обмоток по пазам берут одинаковыми, исходя из полного числа пазов. Число последовательно соединенных витков, полученных по рис. 1–8, в случае напряжения, отличного от 220 в, определяют по формуле:

$$w' = w \times \frac{u'}{220}$$

где: w' – новое число последовательно соединенных витков;
 u' – линейное напряжение, отличное от 220 в.

Пример. Определить число последовательно соединенных витков рабочей и пусковой обмоток и диаметр провода электродвигателя у которого; $P_2 = 1$ кВт, $U = 220$ в, $I = 2,9$ а, $n = 935$ об. мин.

Результаты обмера статора:

$$Di = 77 \text{ мм.}, l = 96 \text{ мм.}, 2p = 6, z = 27$$

Решение.

Определяют площадь полюсного деления (формула 1-32):

$$Q\delta = \frac{\pi \times Di \times l}{2p} = \frac{3,14 \times 7,7 \times 9,6}{6} = 39 \text{ см}^2$$

По рис. 1-8 для $Q\delta = 39 \text{ см}^2$ определяют число последовательно соединенных витков рабочей обмотки, где:

$$w_p = 800$$

Число эффективных витков на один паз равно:

$$w_{\text{эфф}} = \frac{3 \times w}{\frac{2}{3} \times z} = 3 \times \frac{800}{18} = 133$$

При допускаемой плотности тока (табл. 1-8) 5 а/мм^2 сечение проводника будет равно:

$$q_{\text{п}} = \frac{l_1}{\Delta} = \frac{2,9}{5} = 0,58 \text{ мм}^2 \text{ или } d = 0,86 \text{ мм.}$$

Число проводников в пазах вспомогательной пусковой обмотки выразится величиной $w_{\text{н}} = w_p \times 2 = 133 \times 2 = 266$ при сечении каждого эффективного проводника:

$$q = \frac{0,58}{2} = 0,29 \text{ мм}^2 \text{ или } d = 0,62 \text{ мм.}$$

Мощность однофазного электродвигателя по сравнению с трехфазным составляет 70–80%.

а) Определения и характеристики обмоток.

К обмоткам асинхронных электродвигателей относятся обмотки статора и ротора состоящие из отдельных катушек (секций) размещаемых в пазах статора и фазного ротора. Катушки (секции) могут состоят из одного или нескольких витков, соединенных между собой.

Эффективный проводник может быть изготовлен из одного, двух и больше числа элементарных проводников (параллельные проводники).

Обмотка с одним витком в катушке (секции) называется стержневой и обычно применяется в роторных обмотках. Статорные обмотки бывают двух видов: однослойные, в том числе цепная, когда в пазу помещается только одна сторона катушки (секции) и двухслойные, когда в пазу помещаются две катушечные (секционные) стороны.

Схемы обмоток характеризуются следующими основными данными: числом пазов статора и ротора (фазного) Z ; числом фаз m ; числом полюсов $2p$; числом параллельных ветвей a ; числом витков на фазу w_f , шириной катушки (секции) τ ; шагом обмотки y ; числом пазов на полюс и фазу q ; сопряжением фаз "звезда", "треугольник".

При трехфазной обмотке пазы, приходящиеся на один полюс, делятся на три части соответственно числу фаз, образуя три полюсно-фазные группы на полюс.

Катушки в пазах, принадлежащие одной фазе и расположенные под одним полюсом, образуют катушечную группу, называемую полюсно-фазной группой.

Две следующие одна за другой группы одной и той же фазы смещены на две полюсно-фазные группы. В двухслойных обмотках полное число полюсно-фазных групп определяется величиной $2p$, при однослойной обмотке – величиной p .

Шаг обмотки y определяется между двумя сторонами катушки (секции) измеряемый в долях полюсного деления τ окружности статора.

Диаметральный шаг обмотки y равен полюсному делению:

$$y = \tau = \frac{\pi \times Di}{2p} \quad (3 - 1)$$

где Di – диаметр расточки статора, см.

Если шаг обмотки меньше полюсного деления, то он называется укороченным или не полным шагом. Начала фаз не могут быть выбраны произвольно. Так как q (число пазов на полюс и фазу) обычно занимает $\frac{1}{3}$ полюсного деления τ , начала фаз должны быть

сдвинуты на две полюсно-фазные группы или на 60° .

Шесть выведенных концов обмотки (по два от каждой фазы) дают возможность соединять обмотки фаз в звезду или треугольник. При соединении в звезду все начала фаз соединены, а концы выведены на внешнюю цепь.

Соединение фаз в треугольник можно получить, если конец первой фазы будет соединен с

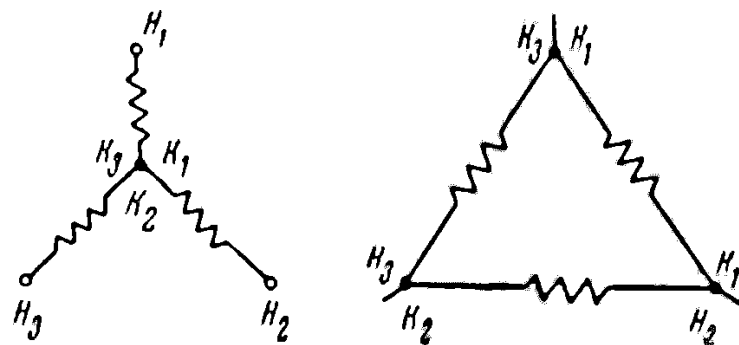


Рис. 3-1.

началом второй, конец второй – с началом третьей, а конец третьей – с началом первой фазы (рис. 3-1).

б) Назначение обмоток.

Наибольшее применение в промышленности получили асинхронные электродвигатели мощностью 1 – 100 кВт. Как правило, такие электродвигатели выполняются с роторной обмоткой в виде беличьей клетки, а в отдельных случаях, в зависимости от требований эксплуатации и с фазным ротором, выполняемым как с подъемом, так и без подъема щеток. Назначение обмотки статора заключается в образовании вращающегося магнитного поля, которое, перемещаясь относительно обмотки ротора, индуцирует в ней эдс и создает ток. Ток обмотки ротора, взаимодействуя магнитным потоком статора, создает момент вращения на валу электродвигателя.

Если магнитный поток, создаваемый статорной обмоткой, будет распределяться по расточке статора синусоидально, то асинхронный электродвигатель будет работать спокойно.

В зависимости от скорости вращения ротора при запуске электродвигателя момент вращения M изобразится кривой 1 (рис. 3-2), где n – рабочее число оборотов в минуту. Если обмотка статора создает не синусоидальный магнитный поток, кривая пускового момента вращения исказится и будет примерно изображаться кривой 2 (см. рис. 3-2).

При таком явлении короткозамкнутый электродвигатель может совсем не развернуться, если момент сопротивления на валу M_1 будет больше момента вращения электродвигателем при пуске, или застрять на скорости вращения n_2 , если момент сопротивления будет равен M_2 .

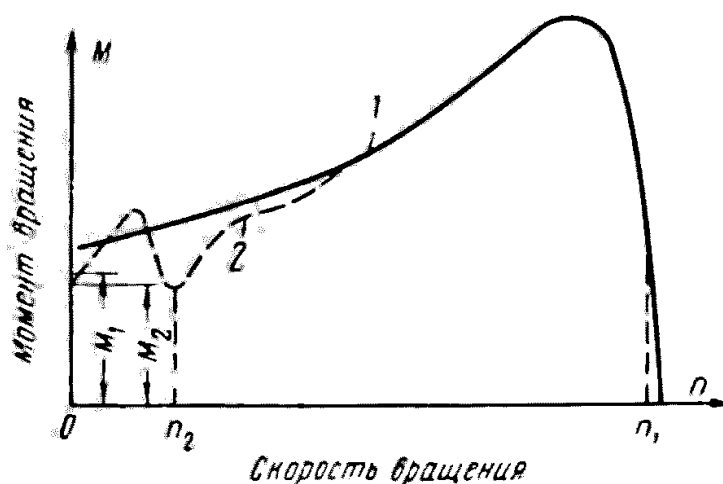


Рис. 3-2. Кривая момента вращения асинхронного электродвигателя.

Помимо этого, при не синусоидальном распределении магнитного потока потери сильно возрастают, коэффициент полезного действия уменьшается, а перегрев увеличивается. Поэтому при модернизации электродвигателей или составлении новых схем обмоток при ремонтах следует стремиться число катушек в катушечных группах увеличить, благодаря чему кривая вращающегося магнитного поля приблизится к синусоиде.

в) Требования к обмоткам.

К обмоткам электродвигателей предъявляется ряд требований общего характера. Напряжения фаз должны быть одинаковыми по величине и сдвинуты по фазе на 120 и 240 электрических градусов, активное и индуктивное сопротивления фаз должны быть одинаковыми и определенной величины для обеспечения необходимых пускового и максимального моментов вращения и т. п. Схема обмотки должна быть составлена так, чтобы обмотка была удобна в изготовлении необходимого числа параллельных ветвей.

Обмотка должна иметь надежную витковую и корпусную изоляцию, а также достаточную механическую прочность, чтобы выдержать механические напряжения при внезапных коротких замыканиях и во время пуска.

Кроме того, при номинальной нагрузке обмотка не должна перегреваться выше допустимых пределов, а лобовые части должны иметь форму, обеспечивающую их хорошую вентиляцию.

г) Характер выполнения обмоток.

По характеру выполнения обмотки распределяются на насыпные, мягкие катушечные и стержневые. По способу расположения в пазах – на однослойные и двухслойные.

Электродвижущая сила катушечной группы не зависит от формы выполнения лобовых частей катушек, так как она индуцируется только в активной части обмотки, т. е. в части катушек, расположенной в пазах, а лобовые части служат только для соединения активных частей обмоток.

При образовании катушек их стороны могут быть расположены в разных фазных зонах, при этом необходимо, чтобы сумма магнитных индукций в местах расположения сторон катушек была равна сумме индукций при расположении сторон на одном фазном участке.

а) Понятие о встречном и согласном соединении витков. Условно началом витка можно назвать тот из двух свободных концов проводников, образующих этот виток, который лежит слева, а концом – лежащий справа. Встречным соединением витков называется соединение двух одноименных концов (т. е. начала одного витка с началом другого или конца одного витка с концом другого), а согласным – соединение двух разноименных концов.

б) Понятие о электрических градусах. Если электродвигатель имеет Z пазов, то геометрический угол между смежными пазами составляет:

$$\alpha_z = \frac{360^\circ}{Z}$$

При одной паре полюсов ($p = 1$) векторы $\mathcal{E}$ с проводников, лежащих в смежных пазах, сдвинуты на векторной диаграмме на тот же угол $\alpha_z = 360^\circ/Z$. В многополосной машине (когда $p > 1$) векторы $\mathcal{E}$ с проводников сдвинуты под углом:

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \alpha_z \times p$$

Таким образом каждому градусу по расточке электродвигателя соответствует p эл. град. в векторной диаграмме.

Примеры. 1. Пусть статор четырехполюсного асинхронного электродвигателя имеет 48 пазов. Тогда геометрический сдвиг в пространстве между соседними пазами:

$$\alpha_z = \frac{360^\circ}{Z} = \frac{360^\circ}{48} = 7,5^\circ$$

а сдвиг между векторами $\mathcal{E}$ с проводников в соседних пазах:

$$\alpha = \alpha_z \times p = 7,5 \times 2 = 15 \text{ эл. град.}$$

2. В шестиполюсном двигателе ($p = 3$) с 72 пазами геометрический сдвиг между соседними пазами составляет:

$$\alpha_z = \frac{360^\circ}{Z} = \frac{360^\circ}{72} = 5^\circ$$

а угол между векторами $\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{C}$ проводников в соседних пазах:

$$\alpha = \alpha_z \times p = 5 \times 3 = 15 \text{ эл. град.}$$

в) Лобовые (не активные) части обмотки, лежащие вне пазов, служат для соединения отдельных проводников, витков или катушек и являются не активными, так как не участвуют в создании $\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{C}$ электродвигателя.

г) Число пазов на полюс и фазу – характерная величина для всех обмоток машин переменного тока, она имеет большое значение при составлении схем. Эту величину обычно обозначают буквой q и определяют по формуле:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} \quad (3 - 2)$$

где Z – полное число пазов статора (или ротора); m – число фаз; p – число пар полюсов ($2p$ – число полюсов). Число пазов на полюс и фазу q может быть как целым, так и дробным. Дробную величину всегда следует показывать правильной дробью.

Примеры 1. В четырехполюсной трехфазной машине с 48 пазами:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{48}{4 \times 3} = 4$$

2. В восьмиполюсной трехфазной машине с 60 пазами:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{60}{8 \times 3} = 2\frac{1}{2}$$

д) Классификация обмоток статоров асинхронных электродвигателей. В зависимости от исполнения обмотки различают:

1) обмотки однослойные катушечные.

2) обмотки однослойные шаблонные, цепные.

3) обмотки двухслойные с диаметральной шаг и с укороченным шагом.

По числу фаз различают трехфазные и двухфазные обмотки.

3-3. Однослойные обмотки.

а) Катушечная концентрическая обмотка. Особенность этой обмотки заключается в том, что на каждой паре полюсов она состоит из отдельных катушек различной формы и длины соединенных в катушечные группы (рис. 3-3). Каждая катушка образуется двумя сторонами, лежащими в пазах статора, где расстояние между ними есть шаг обмотки, который обычно обозначают буквой y и выражают числом пазов. В катушечной концентрической обмотке различные катушки, относящиеся к одной фазе и расположенные на одной шаре полюсов, соединяются последовательно и образуют одну катушечную группу. Эти катушки имеют разные шаги обмотки (рис. 3-3. а).

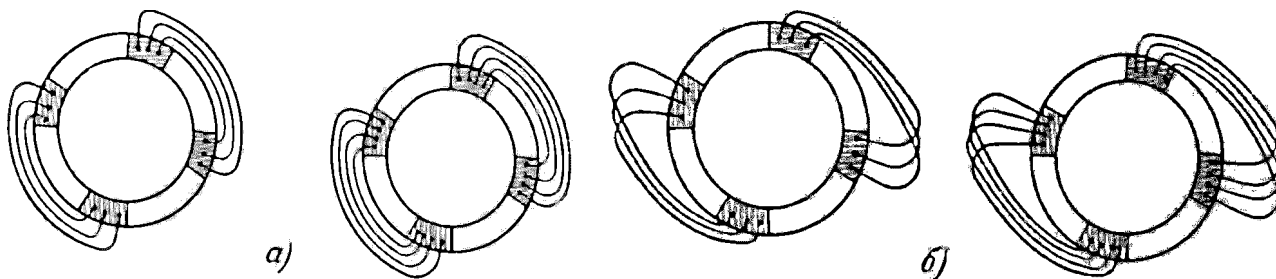


Рис. 3-3. Выполнение лобовых частей катушек однослойных обмоток.
а – концентрические обмотки, б – симметричные шаблонные обмотки.

Например, в четырехполюсной трехфазной машине с 24 пазами число пазов на полюс и фазу составляет:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

что определяет и число катушек в катушечной группе. Отдельные катушки этой группы имеют шаги (рис. 3-4): $y = 7$; $y = 5$. Средний шаг $y = 6$ и равен полюсному делению:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = 6$$

Катушечные концентрические обмотки имеют на каждую пару полюсов и фазу по одной катушечной группе и в общем случае число катушечных групп такой обмотки составит $3 \times q$.

Если число пар полюсов p выражается четным числом, то числе катушечных групп обмотки также будет иметь четное число и лобовые части одной половины катушечных групп можно будет расположить в одной плоскости, а второй половины – в другой плоскости.

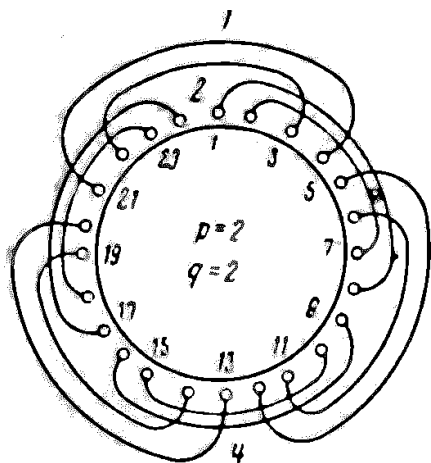


Рис. 3-4.

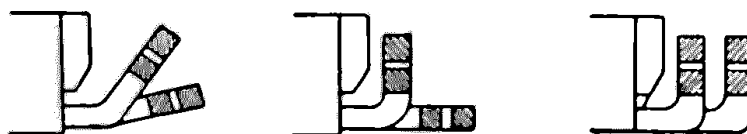


Рис. 3-5.

Если число пар полюсов p обмотки не четное, то число катушечных групп будет также не четным и в каждом ряду не может быть по одинаковому числу катушечных групп. В этом случае при двухрядном расположении лобовых частей (рис. 3-5) одна катушечная группа будет иметь сложную форму вследствие перехода из одного ряда в другой. Так как концентрические обмотки имеют различную форму и длину, при образовании параллельных ветвей необходимо, чтобы не только эдс каждой параллельной ветви были равны, но чтобы их активные и индуктивные сопротивления так же были равны.

Поэтому в двухплоскостной обмотке необходимо, чтобы в каждую параллельную ветвь вошло по одинаковому числу катушечных групп из обеих плоскостей.

Если число параллельных ветвей фазы равно a , то число катушечных групп в параллельной ветви должно быть по $p/2 \times a$ из каждой плоскости и равно целому числу. Например при $a = 2$ это возможно выполнить только при $p = 4, 8, 12$ и т. д., а в остальных случаях сопротивления параллельных ветвей будут неодинаковыми.

При двухплоскостной обмотке иногда образование параллельных ветвей затрудняется вследствие того, что катушечные группы одной фазы имеют разные сопротивления из-за различной формы лобовых частей. Для уменьшения этой не симметрии можно составлять параллельные ветви не из целых катушечных групп, а из их половин (что возможно только при четном значении q). Например, при $p = 2$ и $q = 2$ где каждая параллельная ветвь будет включать половину одной катушечной группы с большим сопротивлением и половину второй группы с меньшим сопротивлением.

В трехплоскостных обмотках катушечные группы фазы лежат в одной плоскости, поэтому образование параллельных ветвей в этих обмотках затруднений не встречает в смысле неравенства сопротивлений ветвей.

Сопротивления фаз в этих обмотках получаются неодинаковыми, так как форма и размеры катушечных групп различны. Во избежание этого можно длинную катушку с одной стороны статора сделать короткой, а с другой стороны длинной, но это очень усложняет производство.

б) Однослойные шаблонные обмотки. Однослойные шаблонные обмотки симметричные, обычно состояются из одинаковых по форме катушек и разделяются на следующие типы:

- 1) простая шаблонная обмотка;
- 2) шаблонная обмотка в развалку;
- 3) цепная обмотка.

По конструктивным соображениям катушки шаблонной обмотки выполняются в форме грани (одна сторона катушки короче другой), что облегчает укладку лобовых частей. Схема простой шаблонной обмотки приведена на рис. 3-6. Эта обмотка отличается от однослойной концентрической только формой катушек, образующих катушечную группу, электрически они совершенно одинаковы и имеют $3p$ катушечных групп.

Однослойная шаблонная обмотка "в развалку" схематически для случая $2p = 2$ и $2 = 24$ представлена на рис. 3-7, а расположение ее лобовых частей на рис. 3-8. Эта обмотка имеет $6p$ катушечных групп.

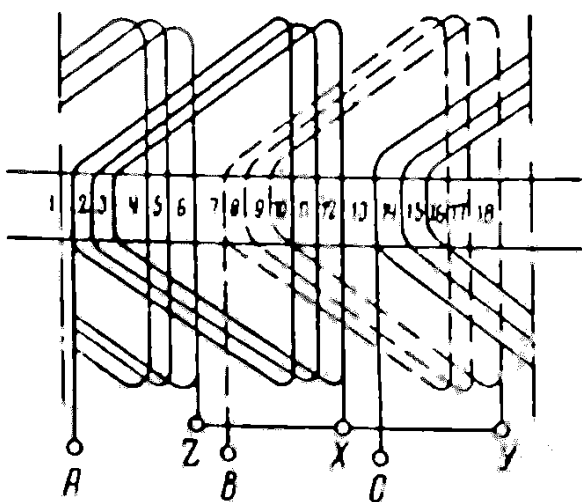


Рис. 3-6. Схема простой шаблонной обмотки.

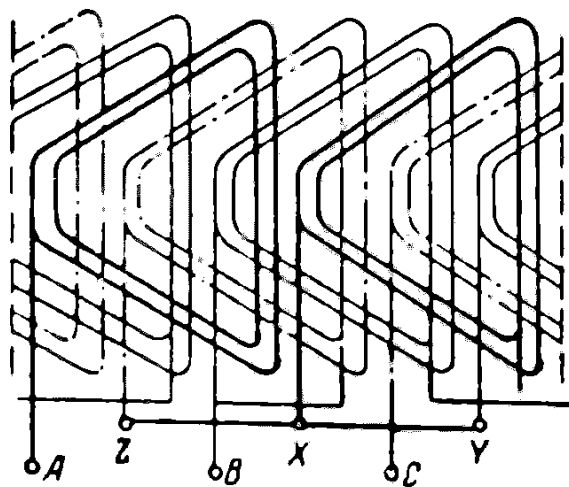


Рис. 3-7. Схема шаблонной обмотки в "развалку", $2p = 2$, $m = 3$, $q = 4$, $Z = 24$.

в) Однослойная цепная обмотка представляет собой промежуточную форму между однослойной катушечной и двухслойной обмотками.

Цепная обмотка выполняется секциями одинаковой величины и формы, где каждая сторона секции полностью занимает паз благодаря чему не требуется дополнительных межкатушечных прокладок и повышается степень заполнения паза обмоткой при меньшем количестве секций, чем у двухслойной обмотки. Число секций цепной обмотки, равно половине числа пазов статора ($Z \times \frac{1}{2}$). Шаг цепной обмотки при нечетном q должен быть обязательно нечетным. Если левые стороны всех секций лежат в нечетных пазах, то для правых сторон остаются только четные пазы, и наоборот.

Число параллельных ветвей при нечетном числе пазов на полюс и фазу может быть равным числу пар полюсов p так как на каждой паре полюсных делений повторяется одно и то же расположение секций всех фаз.

При четном числе пазов на полюс и фазу шаг обмотки не может быть диаметральной, так как он не должен быть четным.

Число параллельных ветвей при числе пазов на полюс и фазу, равном четному числу, при надобности может быть выполнено равным числу полюсов ($2p$). При дробном числе пазов на полюс и фазу возможное число параллельных ветвей равно частному от деления числа пар полюсов на знаменатель дробного числа пазов на полюс и фазу. Если предположить, что число пазов на полюс и фазу равно $2\frac{1}{2}$, а $2p = 8$, то число параллельных ветвей может быть:

$$a = \frac{p}{2} = \frac{4}{2} = 2$$

В цепных обмотках все возможные дробные числа пазов на полюс и фазу технически осуществимы, так как все секции обмотки имеют одинаковые размеры и форму. Цепные обмотки могут быть выполнены с укороченным (или удлинённым) шагом, при этом шаг должен всегда быть не четным.

3–4. Двухслойные обмотки.

В настоящее время в основном применяются двухслойные обмотки. Главные преимущества этих обмоток следующие:

- 1) возможность выбора наилучшего шага обмотки, что ведет к улучшению формы кривой ε_{ds} и поля;
- 2) меньший расход меди и изоляционных материалов, так как при их изготовлении можно применить наибольшую механизацию;
- 3) сравнительно легкий выбор числа витков фазы, при котором сохраняется благоприятное соотношение между током и индукцией в воздушном зазоре (J и $B\delta$);
- 4) большая возможность выбора дробного числа пазов на полюс и фазу.

Двухслойные обмотки подразделяются на петлевые и волновые, причем как те, так и другие могут быть выполнены с целым или дробным числом пазов на полюс и фазу. Обычно катушки петлевой обмотки имеют несколько последовательно соединенных витков. Полукаатушки волновой обмотки могут состоять из нескольких проводников, соединенных параллельно, и тогда они называются двухслойными стержневыми.

Элементом двухслойной стержневой обмотки является полукаатушка или стержень, поэтому и число стержней обмотки равно удвоенному числу пазов. Число катушек в двухслойной катушечной обмотке равно числу пазов Z , а при двухслойной стержневой обмотке – $Z \times 2$.

а) Двухслойные обмотки с диаметральной шагом ($y = \tau$).

Двухслойные обмотки состоят из катушек, у которых одна сторона находится сверху одного паза, а другая сторона – внизу другого паза, расположенного на расстоянии шага обмотки.

В двухслойных обмотках катушки группируются в катушечные группы так же, как и в простых катушечных однослойных обмотках, причем при одинаковом числе пазов и полюсов в обоих случаях двухслойная обмотка будет иметь в два раза больше катушечных групп, чем однослойная, т. е. число групп будет равно числу полюсов $2p$. В однослойных обмотках общее число катушек равно половине числа пазов, а в двухслойных общее число катушек равно числу пазов. На рис. 3–9 приведена схема катушечной группы двухслойной обмотки, состоящей из трех не соединенных катушек, верхние стороны катушек показаны сплошной линией, а нижние – пунктирной. На рис. 3–10 показана схема катушечной группы с соединенными катушками.

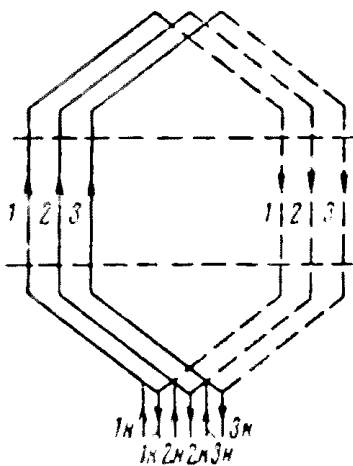


Рис. 3–9. Не соединенная катушечная группа.

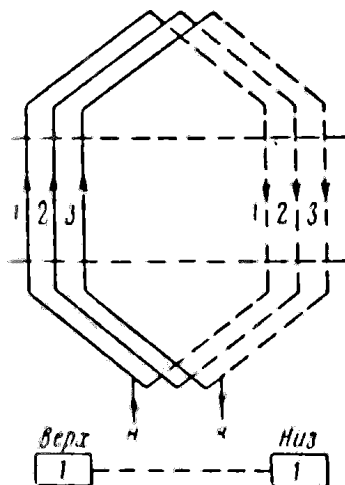


Рис. 3–10. Соединенная катушечная группа.

Вторые катушечные группы для лучшего использования магнитного потока располагают по пазам так, чтобы катушки катушечных групп одной и той же фазы лежали в одних и тех же пазах, тогда $\mathcal{E}$ катушечных групп фазы будут совпадать по фазе. Стороны катушек вторых катушечных групп располагаются в тех же пазах, что и стороны катушек первых катушечных групп.

б) Двухслойные петлевые обмотки с укороченным шагом.

Схема обмотки с укороченным шагом отличается от схемы с диаметральной шагом тем, что внутренний слой обмотки поворачивается на некоторый угол относительно внешнего слоя обмотки, при этом угол поворота зависит от величины укороченного шага. Благодаря применению укороченного шага катушки с надлежаще выбранным коэффициентом укорочения, кривая напряжения, при несинусоидальном распределении магнитного потока получается близкой к синусоидальной.

К другим преимуществам двухслойных обмоток с укороченным шагом можно отнести и уменьшение индуктивного сопротивления обмотки ($\mathcal{E}$ самоиндукции деленная на величину тока). Если взять две катушки с одинаковым числом витков, одна из которых с диаметральной шагом, а другая с укороченным, при одном и том же токе индуктивное сопротивление катушки с укороченным шагом будет меньше, так как длина витка в этой обмотке короче, т. е. магнитный поток, связанный с лобовыми частями, будет меньше. Уменьшение индуктивного сопротивления будет в той части катушки, которая лежит в пазу. Для улучшения вида кривой распределения намагничивающих сил (н. с.), а этим и магнитного поля, следует укорочение шага катушки выбирать таким, чтобы наиболее сильно выраженные гармоники н. с. взаимно уничтожились. Наиболее желательной ширина укороченного шага катушки является $0,8 \times \tau$.

Наиболее желательная ширина катушки (выраженная числом пазов) при различных значениях q и укорочения для числа полюсов больше двух ($2p > 2$) дана в табл. 3–1.

Таблица 3-1.

q	1	2	3	4	5	6	7
τ	3	6	9	12	15	18	31
b ширина укороченного шага	2	5	7	10	12	15	17
$\beta = \frac{b}{\tau}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{7}{9}$	$\frac{10}{12}$	$\frac{12}{15}$	$\frac{15}{18}$	$\frac{17}{21}$

Таблица 3-2.

$q = 2$ – из 1-го в 6 паз
 $q = 3$ – из 1-го в 8 паз
 $q = 4$ – из 1-го в 11 паз
 $q = 5$ – из 1-го в 13 паз
 $q = 6$ – из 1-го в 16 паз
 $q = 7$ – из 1-го в 18 паз

Таблица 3-3.

$q = 2$	$\beta = \frac{b}{\tau} = \frac{5}{6}$	$f = 0,966$
$q = 3$	$\beta = \frac{b}{\tau} = \frac{7}{9}$	$f = 0,945$
$q = 4$	$\beta = \frac{b}{\tau} = \frac{10}{12} = \frac{5}{6}$	$f = 0,956$
$q = 5$	$\beta = \frac{b}{\tau} = \frac{12}{15} = \frac{4}{5}$	$f = 0,951$
$q = 6$	$\beta = \frac{b}{\tau} = \frac{15}{18} = \frac{5}{6}$	$f = 0,966$
$q = 7$	$\beta = \frac{b}{\tau} = \frac{17}{21}$	$f = 0,957$

При числе пазов $2p = 2$ рекомендуется отношение укороченного шага к полюсному делению b/τ брать равным $\frac{2}{3}$. Обмоточный коэффициент укорочения есть отношение эдс катушки при укороченном шаге к эдс катушки с тем же числом витков при диаметральной шаге, равном $\sin\alpha$, который по величине всегда меньше единицы и зависит от величины укорочения шага. Величина обмоточного коэффициента укорочения для определенных случаев приведена в таблице 3-3.

3-5. Составление схем обмоток.

а) Основные требования:

1. В трехфазных обмотках переменного тока начала фаз (а следовательно, и концы) должны быть сдвинуты на 120° эл. град.
2. Все три фазы обмотки должны быть симметричны, их эдс или н. с. равны по величине и сдвинуты на 120° , а формы кривых эдс и н. с. (по фазам) идентичны.
3. Каждая из трех фаз должна включать одинаковое число одинаково соединенных катушечных групп и катушек, а числа активных витков по фазам должны быть равны.
4. При параллельном или смешанном соединениях в каждой из параллельных ветвей число катушек и число витков должны быть одинаковыми.

б) Составление схем концентрических обмоток с последовательным соединением всех катушечных групп. Если число пазов статора $Z = 36$, а число полюсов $2p = 4$, число пазов на полюс и фазу составит:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

На протяжении полюсного деления τ расположены $3q = 9$ пазов. Таким образом, каждому пазу соответствует:

$$\frac{180^\circ}{q \times 3} = \frac{180^\circ}{9} = 20 \text{ эл. град.}$$

а вся обмотка состоит из:

$$\frac{Z}{p} = \frac{36}{2} = 18 \text{ катушек}$$

Для того чтобы получить трехфазную обмотку необходимо сгруппировать эти катушечные группы по две группы, соединенные последовательно. Расположение всех катушечных групп приведено в табл. 3–4. Для того чтобы удовлетворить вышеприведенные требования, составляют первую фазу из двух катушечных групп №1 и 4 для чего соединяют их последовательно, т. е. конец первой катушечной группы с началом второй. Соответственно вторую фазу составим из катушечных групп №3 и 6, а третью из групп №2 и 5. При этом начала фаз, расположенные в пазах 1, 7, 13, будут сдвинуты на 6 пазов или на $6 \times 20 = 120 \text{ эл. град.}$ Такой же сдвиг будут иметь и концы фаз, расположенные в пазах 30, 36 и 6.

При необходимости выполнить данную обмотку с двумя параллельными ветвями в каждую ветвь войдет по одной катушечной группе. В каждую фазу по прежнему войдут те же катушечные группы (см. табл. 3–4). При этом начала первой и четвертой катушечных групп соединяют вместе, так же как и концы этих групп. Аналогично соединяют катушечные группы двух других фаз. Начало первой фазы будет в пазах 1 и 19, начало второй – в пазах 7 и 25, а начало третьей – в пазах 13 и 31

Таблица 3–1.

номер катушечной группы	номер занимаемого паза			
1	1, 2, 3	10, 11, 12		
2	4, 5, 6	13, 14, 15		
3	7, 8, 9,	16, 17, 18		
4			19, 20, 21	28, 29, 30
5			22, 23, 24	31, 32, 33
6			25, 26, 27	34, 35, 36

в) Цепные обмотки.

Порядок составления схемы с последовательным соединением всех катушечных групп для цепной обмотки следующий. Число пазов статора $Z = 48$ и число полюсов $2p = 4$;

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{48}{4 \times 3} = 4$$

На протяжении полюсного деления τ расположены $3 \times q = 12$ пазов. Каждому пазу соответствует:

$$\frac{180^\circ}{12} = 15 \text{ электрических градусов}$$

Так как обмотка однослойная, то она состоит из 24 катушек.

В отличие от катушечной концентрической обмотки вся обмотка имеет не $3p$ ($p \times m$), а $6p$ катушечных группы ($2p \times m$). В данном случае число групп равно двенадцати ($6p = 6 \times 2 = 12$) – по 2 катушки в группе и по $12/3 = 4$ группы в фазе. Цепную обмотку можно выполнить с укороченным шагом, который всегда выражается не четным числом. Если величину шага вместо 12 принять равным 9, то это будет соответствовать укорочению шага, равному $9/12 = 0,75$. Обмотка составляется из четырех последовательно соединенных катушечных групп в каждой фазе. Расположение всех катушечных групп приведено в табл. 3–5.

Таблица 3–5.

номер катушечной группы	номер занимаемого паза
1	1, 3 – 10, 12
2	5, 7 – 14, 16
3	9, 11 – 18, 20
4	13, 15 – 22, 21
5	17, 19 – 20, 28
6	21, 23 – 30, 32
7	25, 27 – 34, 36
8	29, 31 – 38, 40
9	33, 35 – 42, 44
10	37, 39 – 46, 48
11	41, 43 – 2, 1
12	45, 47 – 6, 8

Первую фазу составляют из четырех катушечных групп № 1, 4, 7 и 10, соединив их последовательно, т. е. конец первой катушечной группы соединяют с концом 4-й группы. Начало 1-й катушечной группы – с началом 7-й и конец 7-й – с концом 10-й. Аналогично соединяют катушечные группы двух других фаз, а именно: катушечные группы № 3 и 6, 9 и 12 составят вторую фазу, а № 5, 8, 11 и 2 составят третью фазу. Начала фаз будут расположены в пазах № 1, 9 и 17, а концы соответственно в пазах № 48, 8 и 16. Составленная таким образом трехфазная обмотка удовлетворяет всем основным требованиям.

г) Расположение катушечных групп двухслойной обмотки.

Такая обмотка с $2p = 4$, $Z = 36$, $q = 3$, $y = \tau = 3$, числом катушечных групп $n_1 = m \times 2p = 12$ приведена в табл. 3–6.

Таблица 3–6.

Номер катушечной группы	Номер занимаемого паза	К какой фазе относится
1	1, 2, 3 – 10, 11, 12	1
2	4, 5, 6 – 13, 14, 15	3
3	7, 8, 9 – 16, 17, 18	2
4	10, 11, 12 – 19, 20, 21	1
5	13, 14, 15 – 22, 23, 24	3
6	16, 17, 18 – 25, 26, 27	2
7	19, 20, 21 – 28, 29, 30	1
8	22, 23, 24 – 31, 32, 33	3
9	25, 26, 27 – 34, 35, 36	2
10	28, 29, 30 – 1, 2, 3	1
11	31, 32, 33 – 4, 5, 6	3
12	34, 35, 36 – 7, 8, 9	2

Первая фаза составляется из катушечных групп № 1, 4, 7 и 10, вторая фаза – из катушечных групп № 3, 6, 9, 12 и третья фаза из катушечных групп № 2, 5, 8, 11. Начала фаз располагаются в пазу 1 первая фаза, в пазу 7 вторая фаза и в пазу 13 третья фаза. Концы фаз соответственно располагаются в пазах: 28 – первой фазы, 34 – второй фазы и 4 – третьей фазы. Разные зоны в обоих слоях обмотки точно совпадают, что характерно для двухслойных обмоток с диаметральным шагом.

Расположение катушечных групп двухслойной обмотки, у которой $2p = 4$, $Z = 35$, $q = 3$, а шаг обмотки укороченный $y = \frac{7}{9} \times \tau = 7$ (т. е. 1 – 8), $n_1 = 2p \times m = 12$ приведено в табл. 3–7.

Таблица. 3–7.

Номер катушечной группы	Номер занимаемого паза	К какой фазе относится
1	1, 2, 3 – 8, 9, 10	I
2	4, 5, 6 – 11, 12, 13	III
3	7, 8, 9 – 14, 15, 16	II
4	10, 11, 12 – 17, 18, 19	I
5	13, 14, 15 – 20, 21, 22	III
6	16, 17, 18 – 23, 24, 25	II
7	19, 20, 21 – 26, 27, 28	I
8	22, 23, 24 – 29, 30, 31	III
9	25, 26, 27 – 32, 33, 34	II
10	28, 29, 30 – 35, 36, 1	I
11	31, 32, 33 – 2, 3, 4	III
12	34, 35, 36 – 5, 6, 7	II

Начала и концы фаз располагаются в тех же пазах, что и при диаметральном шаге (см. табл. 3 – 6). Здесь фазные зоны в обоих слоях сдвинуты друг по отношению к другу на величину укорочения шага, т. е. на два паза ($9 - 7 = 2$)

Двухслойные обмотки с укороченным шагом.

Число полюсов – 2	$Z = 18$	$y = 7$
	$Z = 24$	$y = 10$
	$Z = 36$	$y = 15$
Число полюсов – 4	$Z = 24$	$y = 5$
	$Z = 36$	$y = 7$
	$Z = 48$	$y = 10$
	$Z = 60$	$y = 12$
Число полюсов – 6	$Z = 36$	$y = 5$
	$Z = 54$	$y = 7$
	$Z = 72$	$y = 10$
	$Z = 90$	$y = 12$
Число полюсов – 8	$Z = 48$	$y = 6$
	$Z = 72$	$y = 7$
	$Z = 96$	$y = 12$
Число полюсов – 10	$Z = 60$	$y = 5$
	$Z = 90$	$y = 7$
	$Z = 120$	$y = 10$
Число полюсов – 12	$Z = 72$	$y = 5$
	$Z = 108$	$y = 7$

Таблица 3–8.

Наиболее распространенные схемы обмоток статоров электродвигателей мощностью до 100 кВт с укороченным шагом приведены в табл. 3–8.

д) Образование катушечных групп.

Образование катушечных групп можно начинать с любой катушки. При этом в каждую катушечную группу последовательно включают q соседних катушек. После соединения всех катушек в катушечные группы число верхних и нижних концов уменьшится в q раз, т. е. будет равно Z/q свободных верхних концов и столько же свободных нижних концов, которые будут чередоваться. Число катушечных групп обмотки всех фаз равно $6 \times p$ ($2p \times m$), а одной фазы $2p$. Так как основным элементом обмотки с точки зрения образования ее схемы является катушечная группа, а в фазу должны включаться катушечные группы которые находятся друг от друга на расстоянии полюсного шага τ или на 180 эл. град. , и фазная зона составляет 60 эл. град. , то в каждую зону войдут катушечные группы расположенные по окружности статора через две группы.

с) Принцип составления схемы двухслойных обмоток.

Данные обмотки: $2p = 2$, число пазов $Z = 18$, число пазов на полюс и фазу $q = Z/2p \times m = 18/2 \times 3 = 3$. Шаг, вместо диаметрального $y = \tau = 18/2 = 9$, принят укороченным $y = 7$, т. е.

$$\beta = \frac{b}{\tau} = \frac{7}{9} \quad (3.3)$$

где b ширина укороченного шага.

Так как число пазов на полюс и фазу $q = 3$ то на каждую фазную зону статора приходится по три паза. Верхние стороны катушки фазы 1 будут занимать пазы 1, 2, 3, а нижние – в соответствии с шагом 8, 9 и 10. Пропустив две фазные зоны, т. е. $2 \times q = 2 \times 3 = 6$ пазов, находят фазную зону той же фазы, где будет лежать верхняя сторона другой катушечной группы. Номера пазов будут:

$$\begin{aligned} 1 + \tau &= 1 + 9 = 10 \\ 2 + \tau &= 2 + 9 = 11 \\ 3 + \tau &= 3 + 9 = 12 \end{aligned}$$

а нижние стороны второй катушечной группы будут уложены в следующие пазы:

$$\begin{aligned} 10 + b &= 10 + 7 = 17 \\ 11 + b &= 11 + 7 = 18 \\ 12 + b &= 12 + 7 = 19 \end{aligned}$$

так как всего 18 пазов, то нижняя сторона попадает в 1-й паз. Если по схеме число параллельных ветвей $a = 1$, то все катушечные группы соединяются последовательно и соединение следует производить по рис. 3-11, а при параллельном соединении по рис. 3-12.

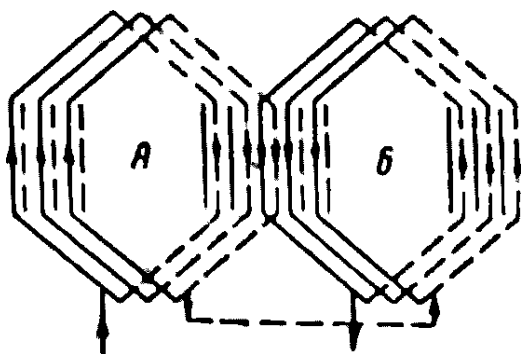


Рис. 3-11. Последовательное соединение двух соседних катушечных групп А и Б.

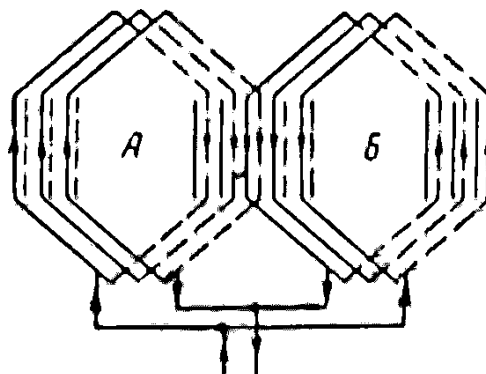


Рис. 3-12. Параллельное соединение двух соседних катушечных групп А и Б.

ж) Упрощенные схемы.

Исходя не из принципиальной схемы, а из процесса укладки обмоток можно упростить процесс нахождения катушечных групп, их начал и концов. При укладке обмоток совершенно безразлично, к какой фазе принадлежит та или иная катушка так как каждая катушка имеет одну верхнюю и одну нижнюю часть катушки, т. е. один верхний, а другой нижний концы, то после укладки всей обмотки получится Z верхних и Z нижних концов (где Z число пазов и число катушек), при этом эти концы всегда располагаются так, что нижние и верхние концы чередуются.

Учитывая, что в каждую катушечную группы последовательно включаются q соседних катушек, начинают образования катушечных групп с любого места, последовательно соединяя q соседних катушек. После соединения всех катушек в катушечные группы число верхних и нижних концов уменьшится в q раз и будет равно Z/q свободных верхних концов и столько же свободных нижних концов, а их число будет равно числу катушечных групп, при этом концы будут чередоваться. Число катушечных групп двухслойных обмоток всех фаз равно $Z/q = 2p \times m$, а одной фазы $2p$.

Так как основным элементом обмотки с точки зрения образования схемы является катушечная группа и в фазу должны включаться катушечные группы, которые находятся друг от друга на расстоянии полюсного шага τ или на 180 эл. град. , то в каждую фазу включаются катушечные группы, расположенные по статору через две группы.

Если условно группа 1 принадлежит I фазе, то другие катушечные группы той же фазы в общем случае будут отличаться на три номера, т. е. 1, 4, 7, 10, 13, 16 и т. д.

Во II фазу включаются группы, смещенные от катушечных групп I фазы на $\frac{2}{3} \times \tau$ или на 120 эл. град. Так как ширина фазного участка равна 60 эл. град. , то номера катушечной группы II фазы будут отличаться от номеров катушечных групп I фазы на 2, т. е. будут иметь номера 3, 6, 9, 12, 15, 18 и т. д. Номера катушечных групп III фазы будут отличаться на 2 от номеров групп II фазы и будут иметь номера 5, 8, 11, 14, 17, 20 и т. д. Чтобы каждый раз не вычерчивать катушечные группы, их можно изображать, как на рис. 3–13. На рис. 3–14 а, приведено условное изображение катушечных групп выводных концов шестиполюсного электродвигателя. Если верхний выводной конец (первой катушки принять за начало фазы I, то нижний выводной конец этой группы (в электрическом отношении) будет ее концом, и если в верхних сторонах катушечных групп ток или $\mathcal{E}$ имеет какое то направление, то в нижних концах это направление будет противоположным.

Левый прямоугольник на рис. 3–14 а, и условно изображает фазную зону, в которой располагаются верхние стороны катушек одной катушечной группы, а правый прямоугольник – фазную зону, в которой располагаются нижние стороны катушек той же катушечной группы.

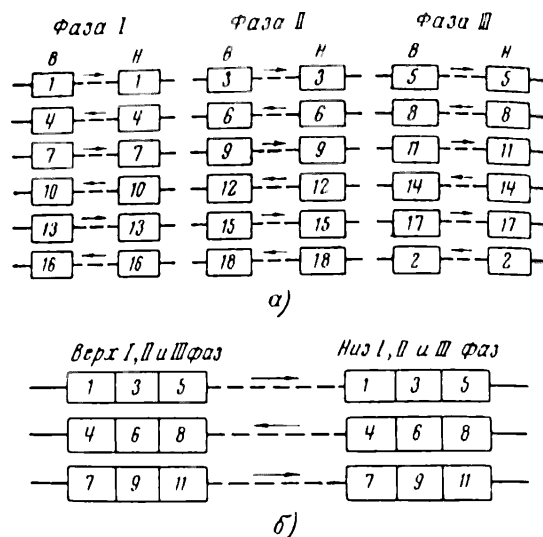


Рис. 3–14. Изображение катушечных групп при $2p = 6$ упрощенной схемы.

Число поставленное в левом прямоугольнике обозначает номер катушечной группы и одновременно ее верхнего конца (начала). Число поставленное в правом прямоугольнике, соответственно обозначает тот же номер катушечной группы и номер ее нижнего выводного конца. Если считать направление тока или *эдс* в первой катушечной группе от верхнего к нижнему концу, то направление тока или *эдс* во всех нечетных катушечных группах будет таким, как в первой, а в четных группах – противоположным. Во II и III фазах направление тока и *эдс* будет таким же, как и в группах I фазы, а так как соединение катушечных групп всех трех фаз должно быть тоже одинаковым, то прямоугольники всех трех фаз могут быть совмещены (рис. 3–14, б).

Номера концов последних катушечных групп зависят от числа полюсов электродвигателя и будут равны:

для фазы	I	$3 \times 2p - 2$
для фазы	II	$3 \times 2p$
для фазы	III	2

Например, для электродвигателя с числом полюсов $2p = 8$ (рис. 3–13). Номера концов последних катушечных групп будут:

для фазы	I	$3 \times 8 - 2 = 22$
для фазы	II	$3 \times 8 = 24$
для фазы	III	$2 = 2$

а для электродвигателя с числом полюсов $2p = 6$

для фазы	I	$3 \times 6 - 2 = 16$
для фазы	II	$3 \times 6 = 18$
для фазы	III	$2 = 2$

3–6. Образование параллельных ветвей статорных обмоток.

В асинхронных электродвигателях величина воздушного зазора между ротором и статором гораздо меньше, чем в синхронных, но в первых магнитный поток создается обмоткой статора, подключенной к сети, поэтому приложенное к зажимам обмотки статора напряжение сети практически уравнивается *эдс* которая индуцируется вращающимся магнитным полем в обмотке. Ввиду того, что приложенное к зажимам обмотки статора напряжение сети постоянно, то и *эдс* параллельных ветвей также постоянны.

Если параллельные ветви выполнить из катушечных групп равномерно распределенных по статору, то один и тот же намагничивающий ток, проходя по катушечной группе, под которой зазор между статором и ротором оказался бы меньшим, создал бы больший магнитный поток, а в месте с большим воздушным зазором – меньший поток, что может привести к одностороннему притяжению ротора.

Их соображений равномерного распределения потока по зазору в асинхронных электродвигателях целесообразнее при двух параллельных ветвях $a = 2$ в разные параллельные ветви включать диаметрально противоположные катушечные группы, а при $a = 3$ в разные параллельные ветви включать катушечные группы отстающие друг от друга на 120 геометрических градусов.

а) Соединение катушечных групп последовательно.

Катушечные группы могут быть соединены либо все последовательно, либо все параллельно, либо иметь то или иное число параллельных ветвей a .

Для последовательного соединения катушечных групп с $a = 1$ следует нижний конец первой катушечной группы соединить с нижним концом второй группы, а верхние концы вывести к зажимам (рис. 3-16, а и б).

Катушечные группы в электрическом отношении можно также последовательно соединить, соединив два верхних конца, а нижние концы вывести к зажимам, при этом необходимо следить за тем, чтобы у всех трех фаз соединение было обязательно одинаковым.

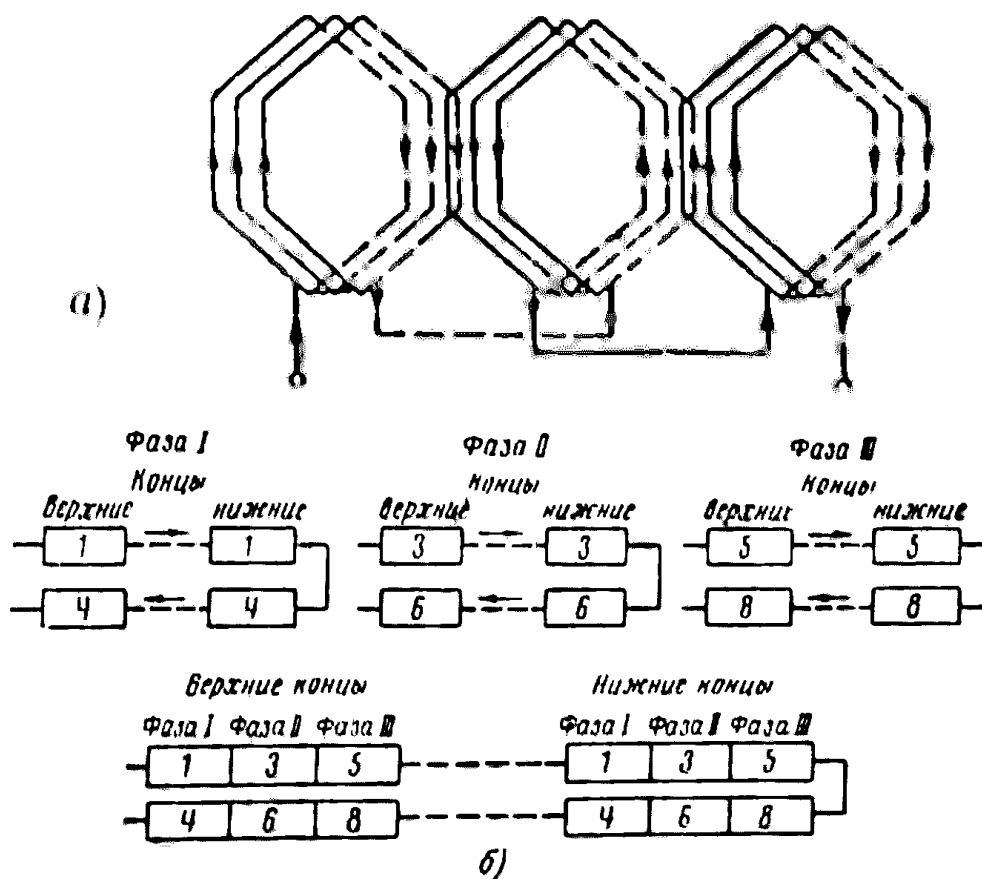


Рис. 3-16.

а – последовательное соединение трех соседних катушечных групп одной фазы,
 б – последовательное соединение двух соседних катушечных групп.

Для соединения схемы (рис. 3-15) в звезду следует концы 22, 21, 2 соединить, а концы 1, 3, 5 вывести к зажимам или наоборот – соединить концы 1, 3, 5, а концы 22, 21, 2 вывести к зажимам. На рис. 3-17 приведена упрощенная схема последовательного соединения катушечных групп обмотки шестиполосного электродвигателя. Эта схема отличается от схемы восьмиполосного электродвигателя тем, что вместо восьми катушечных групп в фазе принято шесть групп в фазе и соответственно уменьшено число концов обмотки. Так как в этих схемах оперируют катушечными группами, а не катушками, где укорочение шага имеет определенное влияние, то число пазов и укорочение шага обмотки на данную схему соединения групп не влияют. На рис. 3-18 дана монтажная схема последовательного соединения всех катушечных групп.

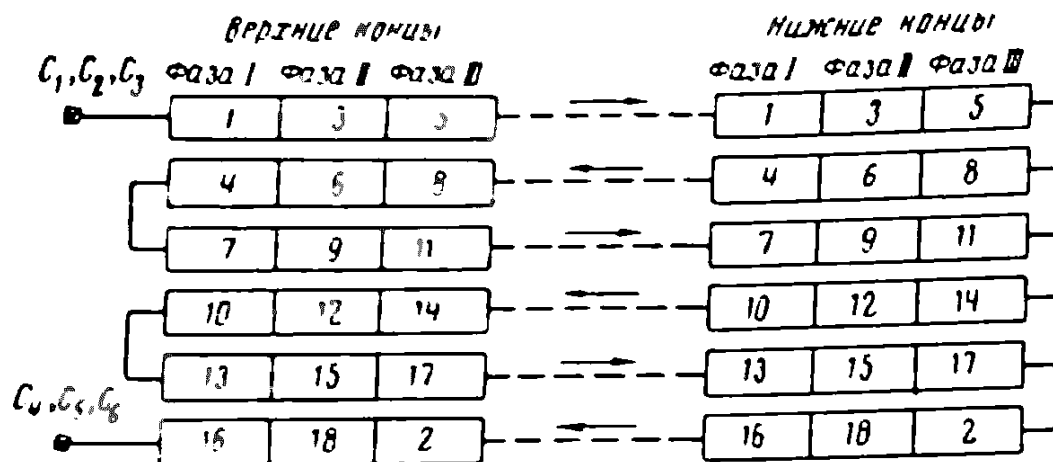


Рис. 3-17. Последовательное соединение всех катушечных групп обмотки
 $2p = 6, m = 3, a = 1$.

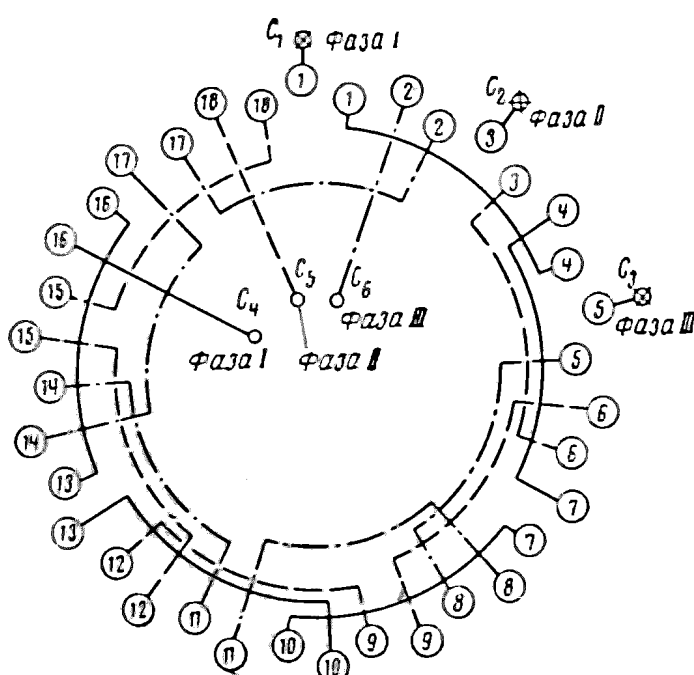


Рис. 3-18. Монтажная схема
 последовательного соединения всех
 катушечных групп,
 $2p = 6, m = 3, a = 1$.

б) Соединение катушечных групп параллельно $a = 2p$.

Двухслойная обмотка в каждой фазе имеет $2p$ катушечных групп. Если все катушечные группы соединить параллельно, то число параллельных ветвей будет равно $2p$, т. е. $a = 2p$. Для параллельного соединения катушечных групп (рис. 3-19) следует к одному зажиму подключить все нечетные верхние концы и все четные нижние концы катушечных групп, а к другому зажиму все не четные нижние концы и все четные верхние концы. Такое соединение объясняется тем, что все нечетные катушечные группы, как и четные, сдвинуты между собой на 360 эл. град. , а четные катушечные сдвинуты по отношению к не четным на 180 эл. град. , так как они лежат под другим полюсом, чем не четные.

в) Соединение катушечных групп в параллельные ветви.

При двух параллельных ветвях ($a = 2$) каждая половина катушечных групп должна быть соединена последовательно в одну ветвь, а затем обе группы параллельно. Составлять параллельные ветви можно как из соседних катушечных групп, так и через одну и таким образом распределять ветвь равномерно по всей обмотке (рис. 3-20, а и б).

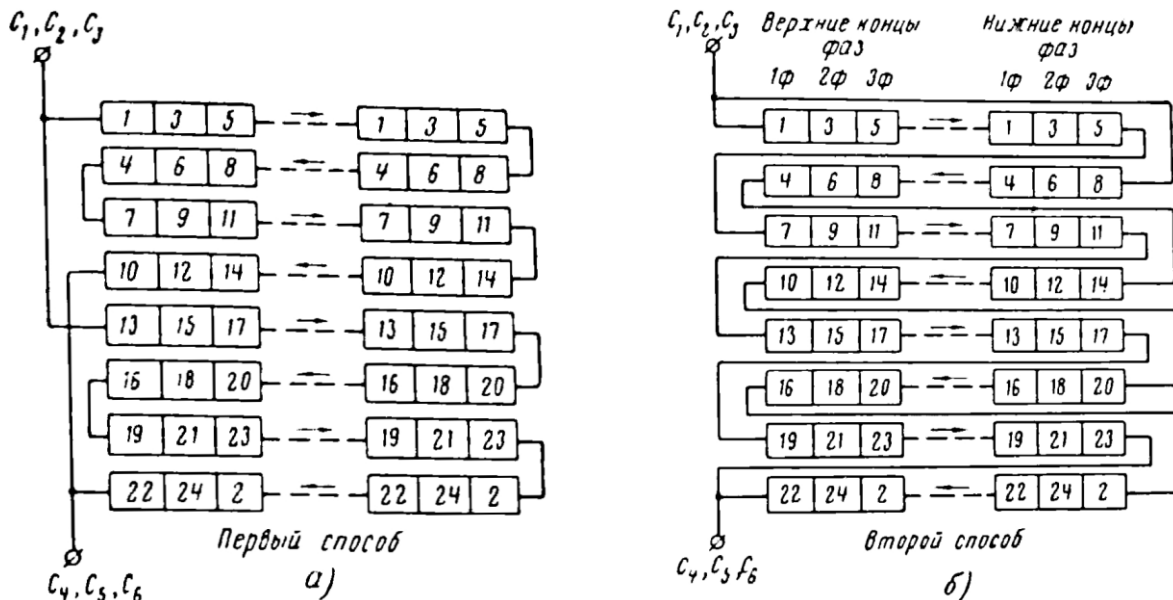


Рис 3–20. Соединение катушечных групп в параллельны; ветви, $2p = 8$, $m = 3$, $a = 2$.

Так как число полюсов, деленное на число параллельных ветвей $2p/a = 2p/p = 2$, то $a = p$ и в каждой параллельной ветви будет по две последовательно соединенные катушечные группы. Учитывая, что число полюсов $2p$ всегда равно четному числу, такое соединение приемлемо при любом числе $2p$.

Если же обмотка имеет число параллельных ветвей, равное $a = p/2$, то соединение может быть осуществлено при условии, если число катушечных групп фазы будет кратно 4, так как при $a = p/2$ число последовательно соединенных катушечных групп в каждой параллельной ветви равно:

$$\frac{2p}{a} = \frac{2p}{\frac{p}{2}} = 4$$

а число параллельных ветвей $a = p/2$ может быть осуществлено в обмотках, где число катушечных групп фазы делится на 4, т. е. обмотки у которых $2p = 4$, $2p = 8$, $2p = 12$ и т. д. Если число ветвей обмотки $a = p/3$, то в каждой параллельной ветви число катушечных групп соединенных последовательно будет:

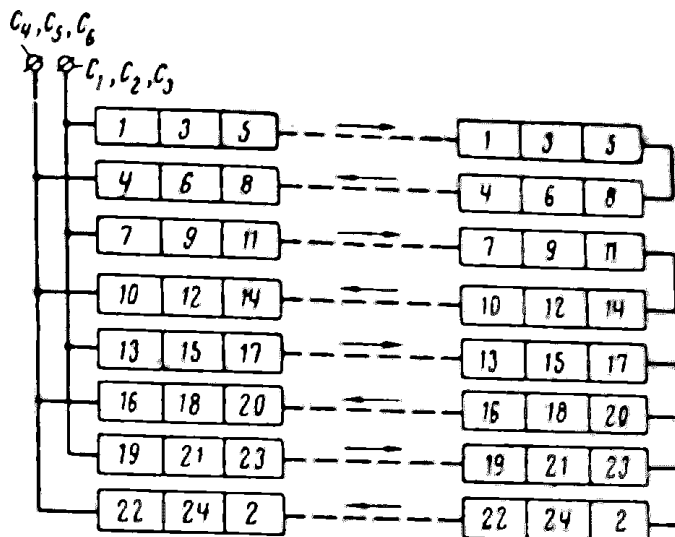
$$\frac{2p}{a} = \frac{2p}{\frac{p}{3}} = 6$$

Такое соединение может иметь место в обмотках, у которых число катушечных групп делится на 6 или у которых число полюсов делится на 6, т. е. $2p = 6$, $2p = 12$, $2p = 18$ и т. д. При числе параллельных ветвей обмотки $a = p/4$ число последовательных соединений катушечных групп будет:

$$\frac{2p}{a} = \frac{2p}{\frac{p}{4}} = 8$$

Поэтому такое число параллельных ветвей $a = p/4$ могут иметь обмотки число полюсов которых делится на 8, т. е. обмотки у которых $2p = 8$, $2p = 16$, и т. п.

Рис. 3-21. Соединение катушечных групп в параллельные ветви, $2p = 8$, $m = 8$, $a = p = 4$.



При числе параллельных ветвей обмотки $a = p/5$ число последовательных соединений катушечных групп будет:

$$\frac{2p}{a} = \frac{2p}{p/5} = 10$$

Поэтому число параллельных ветвей, равное $a = p/5$ могут иметь обмотки у которых число полюсов $2p$ делится на 10, т. е. обмотки с $2p = 10$, $2p = 20$ и т. д.

3-7. Трехфазные обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу имеют во всех катушечных группах одинаковое число катушек, равное $q = Z/6 \times p$. Когда величина q не равняется целому числу т. е. равна дробному числу, очевидно, что выполнить катушечные группы с одинаковым числом катушек не возможно. По этому в таких случаях катушечные группы по числу катушек будут отличаться на единицу. Дробное значение числа пазов на полюс и фазу можно представить так:

$$q = b + \frac{c}{d} \quad (3.4)$$

где b – целое число, c/d – правильная несократимая дробь. Например:

$$q = 2\frac{3}{4}, \text{ где } b = 2, c = 3, d = 4$$

$$q = 2\frac{3}{7}, \text{ где } b = 2, c = 3, d = 7$$

Если же $q = 2\frac{2}{10}$, то необходимо дробь сократить и представить в виде $q = 2\frac{1}{5}$ где $b = 2$, $c = 1$, $d = 5$. Таким образом, дробное q должно состоять из целого числа и правильной не сократимой дроби. В каждой фазе содержится катушек при концентрической катушечной обмотке:

$$p \times q = p \times \left[b + \frac{c}{d} \right] = \frac{p}{d} \times (b \times d + c) \quad (3.5)$$

Катушек при двухслойной:

$$2p \times q = \frac{2p}{d} \times (b \times d + c) \quad (3.6)$$

В обоих случаях общее число катушек в фазе кратно величине $(b \times d + c)$. В обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу, т. е. с дробным q , часть катушечных групп выполняется из числа катушек, равного $b + 1$, а часть из b катушек.

Например, если число пазов на полюс и фазу q равно $2^3/4$, то часть катушечных групп выполняется из $(b + 1) = 2 + 1 = 3$ катушек, а часть из $b = 2$ катушек.

Для получения в обмотке дробного q следует из $(b \times d + c)$ соседних катушек образовать d катушечных групп, из которых катушечных групп по $(b + 1)$ катушек в каждой группе и по $(d - c)$ катушечных групп по b катушек в каждой группе.

Чередование больших и малых катушечных групп должно происходить в определенном порядке.

Если $q = 1^3/7$ при соединении схемы следует взять $b \times d + c = 1 \times 7 + 3 = 10$ катушек и образовать $c = 3$ катушечные группы по $(b + 1) = 1 + 1 = 2$ катушек в каждой группе и $(d - c) = 7 - 3 = 4$ катушечные группы по $b = 1$ катушек в каждой группе. Число чередований катушечных групп будет $2p \times m/d$ и равно целому числу. В противном случае дробного q получить нельзя. Кроме того, для получения симметричной обмотки необходимо, чтобы знаменатель дроби d не был равным или кратным трем. Если в приведенном примере $2p = 14$, то число чередований катушечных групп равно будет $2p \times m/d = 14 \times 3/7 = 6$ по $d = 7$ катушечных групп, а в каждом чередовании по $c = 3$ катушечные группы по $(b + 1) = 1 + 1 = 2$ катушечные группы и $(d - c) = 7 - 3 = 4$ катушечные группы по $b = 1$ катушечной группе, а схема соединения будет следующая:

три катушечные группы ($c = 3$) по 2 катушки в каждой группе $(b + 1)$ и четыре катушечные группы $(d - c)$ по одной катушке в каждой группе $(b = 1)$ с числом чередований, равным шести $2p \times m/d$. В цифровом выражении схема будет выглядеть следующим образом:

$$(2, 2, 2, 1, 1, 1, 1) (2, 2, 2, 1, 1, 1, 1)$$

Цифры в скобках означают число катушек в группе, скобки отделяют чередования. В данном случае число чередований равно шести. Таким образом, составление схемы трехфазной обмотки с дробным значением q отличается от составления схемы такой обмотки при q равном целому числу, тем, что при этом сначала распределяют большие и малые катушечные группы в нужном порядке в каждой фазе и только после этого приступают к их соединению.

Данные возможного распределения катушек двухслойной обмотки по катушечным группам при дробном числе пазов на полюс и фазу q приведены в табл. 3–9.

а) Параллельное соединение.

При параллельном соединении обмоток с дробным q числа катушек в каждой параллельной ветви должны быть одинаковыми, а их эдс совпадать по фазе.

Кроме того, все ветви должны иметь одинаковое число катушечных групп, состоящих из числа катушек, равного $b + 1$, и числа катушек равного b , с одинаковым их чередованием. Так как число чередований катушечных групп на фазу равно $2p/d$ то на каждую параллельную ветвь число чередований будет $2p/d \times a$ и должно быть целым числом для обеспечения равной величины эдс параллельных ветвей.

Выбор числа параллельных ветвей при дробном q более ограничен, чем при целом. Если при $2p = 4$ и целом q число параллельных ветвей могло быть 1, 2 и 4, то при дробном q со знаменателем дроби $d = 2$ число параллельных ветвей может быть равно только 1 и 2, так как $2p/d \times a = 4/a \times 2 = 2$. А если знаменатель дроби $d = 4$, то число параллельных ветвей может быть равно только 1 ($2p/d \times a = 4/1 \times 4 = 1$), то есть соединение должно быть последовательным.

Таблица 3–9.

пп.	q	номера групп		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
		номера фаз		I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	
		Z	$2p$	число катушек в группе																				
1	$1^{1/10}$	33	10	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	и т. д.
2	$1^{1/8}$	27	8	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
3	$1^{1/5}$	36	10	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	$1^{1/4}$	15	4													–	–	–	–	–	–	–	–	
		30	8	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		45	12																					
5	$1^{3/10}$	39	10	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	
6	$1^{3/8}$	33	8	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
7	$1^{2/5}$	42	10	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
8	$1^{1/2}$	9	2																					
		18	4																					
		27	6																					
		36	8																					
		45	10	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
		54	12																					
9	$1^{3/5}$	48	10	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1
10	$1^{5/8}$	39	8	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1
11	$1^{7/10}$	51	10	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	и т. д.
12	$1^{3/4}$	21	4																					
		42	8	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	–	–	–	–	–	–	–	
		63	12																					
13	$1^{4/5}$	54	10	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	1
14	$1^{7/8}$	45	8	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2
15	$1^{9/10}$	57	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	и т. д.
16	$2^{1/10}$	63	10	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	и т. д.
17	$2^{1/8}$	51	8	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	–	и т. д.
18	$2^{1/5}$	66	10	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
19	$2^{1/4}$	27	4													–	–	–	–	–	–	–	–	
		54	8	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	
		84	12																					
20	$2^{3/10}$	69	10	3	2	2	3	2	2	3	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2	2	и т. д.
21	$2^{3/8}$	57	8	3	2	3	2	2	3	2	2	3	2	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	
22	$2^{2/5}$	72	10	3	2	3	2	2	3	2	3	2	2	3	2	3	2	2	3	2	2	3	2	
23	$2^{1/2}$	15	2							–	–	–	–	–	–									
		30	4																					
		45	6	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	
		60	8																					
		75	10																					
		90	12																					
24	$2^{3/5}$	78	10	3	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3	3	2	3	2	и т. д.
25	$2^{5/8}$	63	8	3	3	2	3	3	2	3	2	3	3	2	3	3	2	3	2	3	2	3	2	
26	$2^{7/10}$	81	10	3	3	3	2	3	3	2	3	3	2	3	3	3	2	3	3	2	3	3	2	и т. д.
27	$2^{3/4}$	33	4													–	–	–	–	–	–	–	–	
		66	8	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	2	
		99	12																					
28	$2^{4/5}$	84	10	3	3	3	3	2	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3	2	3	
29	$2^{7/8}$	69	8	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	
30	$2^{9/10}$	87	10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	
31	$3^{1/10}$	93	10	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	и т. д.
32	$3^{1/8}$	75	8	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	

пп.	q	номера групп		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
		номера фаз		I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	
		Z	$2p$	число катушек в группе																				
33	$3^{1/5}$	96	10	4	3	3	3	3	4	3	3	3	3	4	3	3	3	3	4	3	3	3	3	
34	$3^{1/4}$	39	4													-	-	-	-	-	-			
		78	8	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	
		117	12																					
35	$3^{3/10}$	99	18	4	3	3	4	3	3	4	3	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	3	3	и т. д.
36	$3^{3/8}$	81	8	4	3	4	3	4	3	3	4	3	4	3	4	3	3	4	3	4	3	3	4	
37	$3^{2/5}$	102	10	4	3	4	3	3	4	3	4	3	3	4	3	4	3	3	4	3	4	3	3	
38	$3^{1/2}$	21	2								-	-	-	-	-	-								
		42	4																					
		63	6																					
		84	8	4	3	4	3	4	3	4	4	3	4	3	4	3	4	4	3	4	3	4	3	
		105	10																					
		126	12																					
39	$3^{3/5}$	108	10	4	4	3	4	3	4	4	3	4	3	4	4	3	4	3	4	4	3	4	3	
40	$3^{5/8}$	87	8	4	4	3	4	4	3	4	3	4	4	3	4	4	3	4	3	4	4	3	4	
41	$3^{7/10}$	111	10	4	4	4	3	4	4	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4	3	4	4	3	
42	$3^{3/4}$	45	4													-	-	-	-	-	-			
		90	8	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	
43	$3^{4/5}$	114	10	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	
44	$3^{7/8}$	93	8	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	
45	$3^{9/10}$	117	10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	и т. д.
46	$4^{1/8}$	99	8	5	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	
47	$4^{1/5}$	126	10	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	
48	$4^{1/4}$	51	4													-	-	-	-	-	-			
		102	8	5	4	4	4	5	4	4	4	5	4	4	4	5	4	4	5	4	4	5	4	
49	$4^{3/8}$	105	8	5	4	5	4	4	5	4	4	5	4	5	4	4	5	4	4	5	4	4		
50	$4^{1/2}$	27	2							-	-	-	-	-	-									
		54	4																					
		81	6	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	
		108	8																					
51	$4^{5/8}$	111	8	5	5	4	5	5	4	5	4	5	5	4	5	5	4	5	4	5	4	5	4	
52	$4^{3/4}$	57	4													-	-	-	-	-	-			
		114	8	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	5	
53	$4^{7/8}$	117	8	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	
54	$5^{1/4}$	63	4													-	-	-	-					
		125	8	6	5	5	5	6	5	5	5	6	5	5	5	6	5	5	5	6	5	5	5	
55	$5^{1/2}$	33	2							-	-	-	-	-	-									
		66	4	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	
		99	6																					
56	$5^{3/4}$	69	4	6	6	6	5	6	6	6	5	6	6	6	5	-	-	-	-	-	-			
57	$6^{1/4}$	75	4	7	6	6	6	7	6	6	6	7	6	6	6									
58	$6^{1/2}$	39	2							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		78	4	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	
		117	6																					
59	$6^{3/4}$	81	4	7	7	7	6	7	7	7	6	7	7	7	6		-	-	-	-	-			

Если числитель дроби s не равен единице и не равен $d - 1$, то чередование больших и малых катушечных групп можно определить так:

Составляют таблицу из s строк и d столбиков. В таблицу, начиная с верхней строки первого столбца, вписывают s чисел, равных $b + 1$. Затем $d - s$ чисел, равных b , потом снова s чисел, равных $b + 1$ и $d - s$ чисел, равных b и т. д., пока не будут заполнены все d столбцов.

Если $q = 1^4/7$, где $b = 1, c = 4, d = 7$, откуда $b + 1 = 2, d - c = 3$, на базе этих цифр составляется таблица из c строк и d столбцов.

2	1	2	1	2	1	2
2	1	2	1	2	2	1
2	1	2	2	1	2	1
2	2	1	2	1	2	1

Если $q = 2^2/5$ где $b = 2, c = 2$ и $d = 5$, откуда $b + 1 = 3$ и $d - c = 3$, составляют таблиц из двух строк ($c = 2$), пяти столбцов ($d = 5$):

3	2	2	3	2
3	2	3	2	2

Чередование катушечных групп можно брать по любой строке.

Чередование катушечных групп можно определить и другим способом.

Составляют таблицу из $d - c$ строк и d столбцов и вписывают сначала $d - c$ чисел равных b , затем c чисел, равных $b + 1$, потом снова $d - c$ чисел равных b и c чисел, равных $b + 1$, и т. д. При $q = 2^2/5$ таблица будет иметь три строки ($d - c = 5 - 2 = 3$) и пять столбцов ($d = 5$).

2	3	2	3	2
2	3	2	2	3
2	2	3	2	3

Чередование катушечных групп можно брать по любой строке.

б) Катушечная концентрическая обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу (дробное q).

Такая обмотка выполнима только при четном числе пазов, кратном трем.

У такой обмотки число чередований равно p/d с количеством групп, равным d .

Предположим, что электродвигатель имеет $Z = 30$ и $2p = 4$, обмотка катушечная, концентрическая с числом пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{30}{4 \times 3} = 2\frac{1}{2}$$

где $b = 2, c = 1, d = 2$

У этой обмотки в каждом чередовании должно быть: катушечная группа из $(b + 1) = 3$ катушек (большая катушечная группа), состоящая из $c = 1$ катушечных групп и по $b = 2$ катушек (малая катушечная группа) по $d - c = 2 - 1 = 1$ катушечных групп. Катушечная обмотка будет иметь число чередований: $p/d = 1$, она отличается от двухслойной обмотки только числом чередований, которое для этой обмотки составит $p/d = 4/2 = 2$. Количество групп этой обмотки равно $d = 2$, т. е. необходимое чередование и количество групп равны $(3 - 2)$ или $(2 - 3)$.

В катушечной концентрической обмотке диаметральный шаг обмотки сохраняется и для дробного значения q , который получается как средняя арифметическая величина из средних шагов групп одного чередования.

В тех случаях, когда число как больших так и малых катушечных групп в одном чередовании больше 1, порядок следования этих групп в одном чередовании производится как об этом изложено в п. "в".

в) Соединение катушечных групп.

Чередование фаз при дробном числе пазов на полюс и фазу такое же, как и при целом q , поэтому порядок включения катушечных групп в каждой фазе при дробном q может быть легко определен. При целом q чередование фаз следующее: 1н, IIIк, IIн, Iк, IIIн, IIк и т. д. и такое же чередование остается и при дробном. Если первую катушечную группу отнести к фазе I, то этой же фазе будут принадлежать такие же катушечные группы, как и при целом q . Номера катушечных групп распределяются:

фаза	I –	1, 4, 7, 10	$(2p \times m - 2)$
фаза	II –	3, 6, 9, 12	$(2p \times m)$
фаза	III –	5, 8, 11, 14	(2)

где катушечные группы 1, 3 и 5 приняты начальными. Для того чтобы обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу была симметричной, необходимо, чтобы $2p/a \times d$ равнялось целому числу и знаменатель дроби не был равен или кратен трем, так как при знаменателе равном или кратном трем в фазах получится не одинаковое число катушек, что не допустимо.

3–8. Параллельное соединение катушечных групп в фазе.

Способ соединения катушечных групп в фазе определяется при расчете машины. Поскольку при дробном значении q катушечные группы в каждой фазе имеют не одинаковое число катушек, возможности образования из них параллельных ветвей значительно ограничены.

В дальнейшем будут рассматриваться только двухслойные обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, так как концентрические катушечные обмотки в этом случае редко применяются.

Условие выполнимости параллельного соединения катушечных групп фазы такой обмотки при числе параллельных ветвей $a > 2p$ выражается следующей формулой: $2p/a \times d =$ целому числу. Только в этом случае все параллельные ветви в одной фазе будут совершенно симметричны друг по отношению к другу. В этой формуле:

$2p$ – число полюсов

a – число параллельных ветвей

d – знаменатель несократимой дроби:

$$q = b + \frac{c}{d}$$

Соединение в две параллельные ветви при $a = 2$, $2p/a \times d = p/d =$ целому числу, и если $2p = 4$, $Z = 30$, $q = 2\frac{1}{2}$, $b = 2$, $c = 1$, $d = 2$, тогда $p/d = 2/2 = 1 =$ целому числу. Очевидно, что при четырех полюсах обмотка может быть соединена в две параллельные ветви, если величина $d = 2$. Если в рассматриваемом случае в каждой фазе 10 катушек и четыре катушечные группы, число чередований составит $2p/d = 4/2 = 2$, в каждом чередовании будут по одной большой (3 катушки) и по одной малой катушечной группе (2 катушки). Следовательно, в каждую параллельную ветвь должны войти две соседние катушечные группы, одна большая и одна маленькая. Обе параллельные ветви в каждой фазе будут симметричны.

В шестиполюсной машине ($2p = 6$) соединение в две параллельные ветви невозможно, так как $p/d = 3/2 =$ не целому числу.

При числе полюсов $2p = 8$, необходимо чтобы $2p/a \times d = 8/2 \times 2 = 8/4 =$ целому числу. В этом случае число параллельных ветвей может быть равным двум или четырем. Если $2p = 10$, то $p/d = 5/d$ и соединение в две параллельные ветви возможно только при $d = 5$. При $2p = 12$, $p/d = 6/d =$ целому числу. В этом случае, соединение в две параллельные ветви возможно только при $d = 2$.

Соединение в три параллельные ветви $2p = 2$, $2p = 4$, $2p = 8$, $2p = 10$ не возможно. При числе полюсов равном $2p = 6$, $2p/3 \times d = 6/3 \times d = 2/d =$ целому числу, и образование трех параллельных ветвей возможно только при $d = 2$. Если число полюсов $2p = 12$, то $2p/a \times d = 12/3 \times d = 12/3 \times d = 4/d =$ целому числу, и образование трех параллельных ветвей возможно при $d = 2$ и при $d = 4$.

Соединение в четыре параллельные ветви для случая, когда $2p = 8$. Для восьмиполюсной машины $2p/a \times d = 8/4 \times d = 2/d =$ целому числу, симметричная обмотка возможна только для случая $d = 2$.

При $2p = 10$ получение симметричной обмотки невозможно. Если $2p = 12$, то $2p/a \times d = 12/4 \times d = 3/d =$ целому числу. Но так как d не может быть числом кратным трем, то и в этом случае симметричная обмотка не выполняема.

В табл. 3–10 указаны возможное число параллельных ветвей и значения d для разных чисел полюсов.

Таблица 3–10.

Возможное число параллельных ветвей.

число параллельных ветвей	число полюсов				
	4	6	8	10	12
	возможные значения d				
2	2	–	2 и 4	5	2
3	–	2	–	–	2 и 4
4	–	–	2	–	–

3–9. Обмотки с не равновитковыми катушками.

При расчетах или пересчетах электродвигателей имеют место случаи, когда необходимый магнитный поток может получиться только при катушках с не одинаковым числом последовательно соединенных витков. Обычно при двухслойных обмотках одну половину комплекта статорных катушек (секции) делают с одним числом витков, и другую половину с числом витков на 1 или 2 больше.

а) Первый способ укладки (при u равном не четному числу, табл. 3–11).

Практически такие катушки (большие и малые) располагаются в пазах так, что при расчетном шаге обмотки они (малые и большие) чередуются через один паз, при этом число катушек должно быть четным числом, так как количества "больших" и "малых" катушек должно быть одинаковым.

Так как в двухслойных обмотках число катушек равно числу пазов, то произведение числа пар полюсов на число пазов на полюс и фазу при этом способе укладки должно равняться целому числу ($p \times q =$ целое число). Так как при q , равном целому числу, произведение всегда равно целому числу, то этот способ укладки применим для всех случаев.

б) Второй способ укладки (при u равном четному числу).

При втором способе укладки (табл. 3–11) шаг обмотки должен быть четным, а катушки попарно чередоваться, т. е. каждой паре "малых" катушек должна соответствовать пара "больших", почему и число катушек должно быть кратным 4. В этом случае произведение числа пар полюсов на число пазов на полюс и фазу должно равняться четному числу, т. е. $p \times q =$ четному числу. Для случая, когда число пар полюсов p и число на полюс и фазу не четные числа, второй способ укладки катушек не приемлем.

Таблица 3–11. Условия для выполнения двухслойных трехфазных обмоток переменного тока при не равновитковых секциях. Общее условия.

шаг у	<i>Нечетный</i>  а)		
возможная укладка секций			
условие для выполнения укладки	$p \times q$ – целое		
возможное значение q	Четное $q = 2 \times k$	Нечетное $q = 2 \times k + 1$	Дробное $q = k + 1/2$
возможное значение p	любое	любое	любое
условия для образования параллельных ветвей, a .	$2 \times p/a = n$	$p/a = n$	$p/a = 2 \times n$
соединение параллельных ветвей	сосредоточенное и распределенное	сосредоточенное и парнополюсное распределение	сосредоточенное и четырехполюсное

шаг у	<i>Четный</i>  б)			
возможная укладка секций				
условие для выполнения укладки	$p \times q$ – четное шаг у не должен делиться на 4			
возможное значение q	Кратно 4 $q = 4 \times k$	Четное $q = 4 \times k + 2$	Нечетное $q = 4 \times k + 1$	дробное $q = k + 1/2$
возможное значение p	любое	любое	четное	кратно 4
условия для образования параллельных ветвей, a .	$2 \times p/a = n$	$p/a = n$	$p/a = n$	$p/a = 2 \times n$
соединение параллельных ветвей	сосредоточенное и распределенное	сосредоточенное и парнополюсное распределение	сосредоточенное и распределенное	комбинированное***

Возможные значения (практические) для параллельных ветвей**

p – число пар полюсов	1	1, 2	1	–	1, 2	1	–	–
	2	1, 2, 4	1, 2	1	1, 2, 4	1, 2	1, 2	–
	3	1, 2, 3, 6	1, 3	1	1, 2, 3, 6	1, 3	–	–
	4	1, 2, 4, 8	1, 2, 4	1, 2	1, 2, 4, 8	1, 2, 4	1, 2, 4	1, 5
	5	1, 2, 5	1, 5	–	1, 2, 5	1, 5	–	–
	6	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 6	1, 3	1, 2, 3, 6	1, 2, 3, 6	1, 2, 3, 6	–
	7	1, 2, 7	1, 7	–	1, 2, 7	1, 7	–	–
	8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4
	9	1, 2, 3, 6	1, 3	–	1, 2, 3, 6	1, 3	–	–
	10	1, 2, 4, 5	1, 2, 5	1, 5	1, 2, 4, 5	1, 2, 5	1, 2, 5	–
	12	1, 2, 4, 6	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 6	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 6
	14	1, 2, 4, 7	1, 2, 7	1, 7	1, 2, 4, 7	1, 2, 7	1, 2, 7	–
	15	1, 2, 3, 5, 6	1, 3, 5	–	1, 2, 3, 5, 6	1, 3, 5	–	–
	16	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8
	18	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 6	1, 3	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 6	1, 2, 3, 6	–

* k и n – любые целые числа. **В таблице указано возможное число параллельных ветвей и число полюсов выполняющиеся практически в машинах. ***В одну параллельную ветвь можно соединить последовательно только четные или только не четные пары полюсов (пара – два рядом лежащих полюса).

в) Образование параллельных ветвей.

При образовании параллельных ветвей по первому способу укладки (табл. 3–11) необходимо включить в каждую параллельную ветвь по одинаковому числу одинаковых катушечных группы, так как при этом условии эдс параллельных ветвей будут одинаковыми по величине. Для обеспечения этого требования при образовании параллельных ветвей необходимо, чтобы число катушечных групп при четном числе катушек в каждой катушечной группе делилось без остатка на число параллельных ветвей, т. е. $2p/a =$ целому числу. При нечетном числе катушек в катушечной группе одинаковые по количеству катушек катушечные группы чередуются через одну и для образования параллельных ветвей должно быть выполнено требование: $2p/2a = p/a =$ целому числу. Если при этом способе укладки $q = 2$ или 6, для образования параллельных ветвей p/a должно равняться целому числу. При $q = 4$ параллельные ветви могут быть образованы, если $2p/a =$ целому числу. При нечетном q параллельные ветви могут быть образованы, если $p/a =$ четному числу. При дробном q , где знаменатель дроби $d = 2$, при первом способе укладки одинаковые катушечные группы фазы располагаются через число пазов, определяемое выражением $4 \times \tau = 6 \times (b \times d + c)$ пазов, а для образования параллельных ветвей должно быть выполнено условие, когда $p/2a =$ целому числу. Для обмоток, укладываемых по второму способу, для образования параллельных ветвей необходимо, чтобы $p/4a$ было равно целому числу (см. табл. 3–11).

3–10. Выбор начал фазных обмоток с дробным q .

В электрических системах различают геометрические и электрические градусы, где два полюса принимаются за полную окружность равную 360 эл. град. В шестиполюсном электродвигателе каждая пара полюсов занимает 120 геометрических градусов $360/p$, где каждый градус соответствует 3 эл. град., так как $p = 3$ и вся окружность статора составит $360 \times p = 360 \times 3 = 1080$ эл. град. Геометрический угол между двумя соседними пазами:

$$\gamma_{\text{ГЕОМ}}^{\circ} = \frac{2 \times 180^{\circ}}{Z} = \frac{360^{\circ}}{Z}$$

где Z – число пазов, а электрический угол между двумя соседними пазами:

$$\gamma_{\text{эл}}^{\circ} = \frac{180^{\circ} \times 2p}{Z} = \frac{360^{\circ} \times p}{Z}$$

где $2p$ – число полюсов или p – число пар полюсов.

Начала соседних фаз отставлены друг от друга на определенное число пазов n_z , а электрический сдвиг между началами фаз будет равен:

$$\alpha_{\text{эл}}^{\circ} = n_z \times \gamma_{\text{эл}}^{\circ}$$

откуда число пазов между началами соседних фаз определится формулой:

$$n_z = \frac{\alpha_{\text{эл}}^{\circ}}{\gamma_{\text{эл}}^{\circ}}$$

В трехфазных обмотках начала фаз должны быть симметрично расположены на расстоянии двойного полюсного деления $2 \times \tau$ друг от друга и равны $\alpha_{\text{эл}} = 120^\circ, 240^\circ, 480^\circ$ и т. д. Для простоты составления схем обмоток за начало первой фазы H_1 принимается любой паз, называемый первым пазом, тогда начало второй фазы $H_2 = n_Z + 1$, а началом третьей фазы $H_3 = 2 \times n_Z + 1$. Таким же путем следует проверить и электрический угол между концами фаз. Если угол сдвига соответствует данному числу фаз, обмотку следует считать симметричной.

Пример. Обмотка электродвигателя имеет $Z = 27, 2p = 4, m = 3$ число пазов на полюс и фазу $q = 2\frac{1}{4}$. Электрический угол сдвига между соседними пазами:

$$\gamma_{\text{эл}}^\circ = \frac{360^\circ \times p}{Z} = \frac{360^\circ \times 2}{27} = 26,7^\circ$$

Число пазов между началами соседних фаз:

$$n_Z = \frac{\alpha_{\text{эл}}^\circ}{\gamma_{\text{эл}}^\circ} = \frac{120^\circ}{26,7^\circ} = 4,5$$

Так как величина числа пазов получилась дробной, то этот выбор начала фаз следует считать не приемлемым. Если взять не 60° зону ($\alpha_{\text{эл}} = 120^\circ$), а 120° зону, где $\alpha_{\text{эл}} = 240^\circ$, то:

$$n_Z = \frac{\alpha_{\text{эл}}^\circ}{\gamma_{\text{эл}}^\circ} = \frac{240^\circ}{26,7^\circ} = 9$$

откуда

$$\begin{aligned} H_1 &= 1 \\ H_2 - n_Z + 1 &= 9 + 1 = 10 \\ H_3 - 2 \times n_Z + 1 &= 18 + 1 = 19 \end{aligned}$$

Этот вариант также следует считать не приемлемым, так как H_2 совпадает с концом третьей фазы K_3 . В таких случаях $\alpha_{\text{эл}}$ принимается равным 480° , что значения не имеет, так как $\sin 120^\circ = \sin 480^\circ$ и тогда:

$$n_Z = \frac{\alpha_{\text{эл}}^\circ}{\gamma_{\text{эл}}^\circ} = \frac{480^\circ}{26,7^\circ} = 18$$

откуда

$$\begin{aligned} H_1 &= 1 \\ H_2 &= 18 + 1 = 19 \\ H_3 &= 36 + 1 = 37 \end{aligned}$$

Так как число пазов $Z_3 = 27$, то H_3 будет в 10 пазу ($37 - 27$).

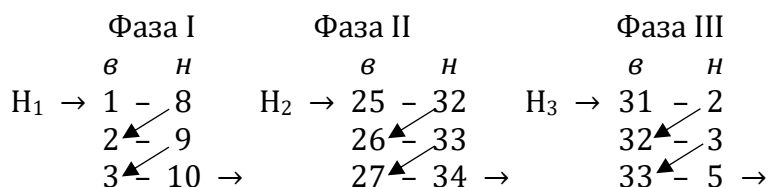
3–11. Составление таблиц обмоток.

Чтобы избежать трудоемкой работы при вычерчивании схем, когда практически обмотчику требуется только знать, в каком порядке следует соединить секции друг с другом, схема может быть заменена таблицей обмоток. В эту таблицу вносятся номера тех пазов, проводники которых соединяются. Составление таких таблиц производится механически по определенному шаблону. При составлении таблицы обмотки, предположим, четырехполюсного электродвигателя с двухслойной обмоткой, у которого число пазов $Z = 36$, с числом пазов на полюс и фазу $q = Z/2p \times m = 36/3 \times 4 = 3$, при шаге обмотки $y = 7$ и числом параллельных ветвей $a = 2$ каждая секция в таблице изображается номерами тех пазов, в которых лежат ее стороны.

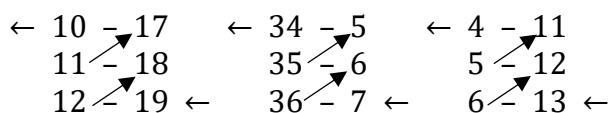
Причем номера пазов сторон, находящихся в верхнем слое, ставятся, как пример слева, а находящихся в нижнем слое – справа и наоборот. Соединения секции изображаются стрелками, направленными от начала данной фазы к ее концу.

По технологическим причинам начала всех фаз статорных обмоток по возможности следует располагать ближе друг к другу.

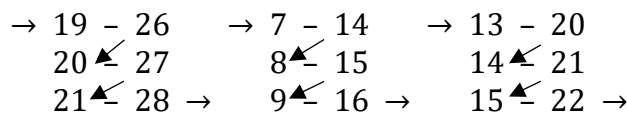
Если начало первой фазы лежит в пазу 1, то при целом числе пазов на полюс и фазу начало второй фазы можно уложить в паз отстоящий от первого на расстоянии $2q$ в сторону возрастания номеров пазов или в сторону убывания номеров пазов, а начало третьей фазы на $4q$ в сторону возрастания или на $2q$ в сторону убывания номеров пазов. Исходя из изложенного, можно составить таблицу для группы, равной q , где в данном случае $q = 3$.



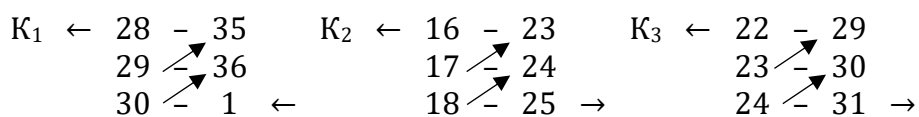
Для следующих катушечных групп, состоящих из трех секций в каждой фазе, таблица может быть продолжена путем прибавления к номерам первой части таблицы величины, равной $3q$, т. е. 9, при этом направление стрелок должно быть противоположным, так как направление токов в этих группах будет обратным.



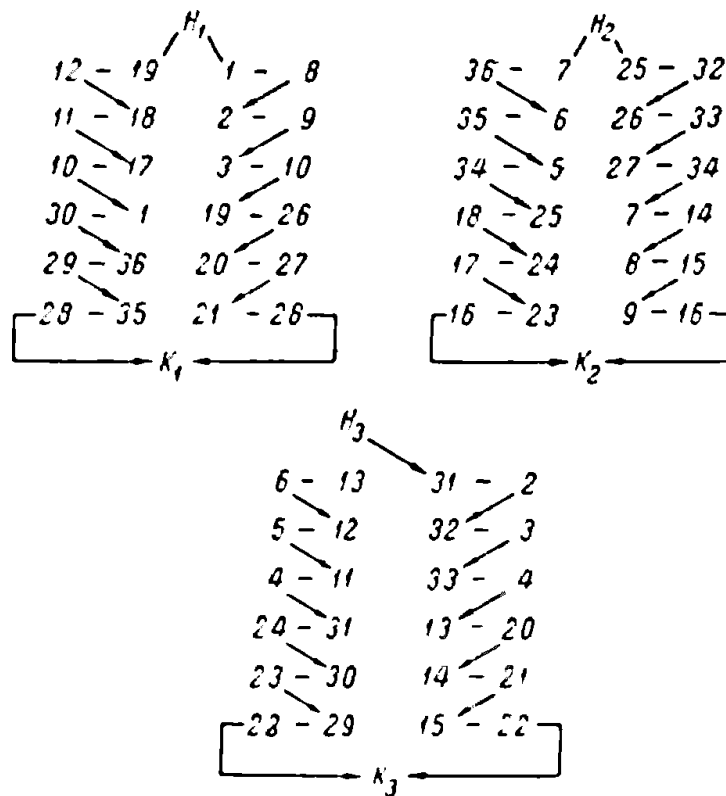
Для следующих групп, состоящих из трех секций в каждой фазе, в таблице увеличиваются номера опять на $3q = 9$, при этом направление стрелок здесь должно быть тем же, что в первой группе, и обратно направлению второй группы.



Последняя часть таблицы получается аналогично второй, но с обратным направлением стрелок.



После составления таблиц их следует соединить так, чтобы получились заданные две параллельные ветви в каждой фазе. В состав одной параллельной ветви не рекомендуется включать катушечные группы секций, расположенных рядом, а соединение следует производить так, чтобы катушечные группы, входящие в состав каждой параллельной ветви, были равномерно расположены по окружности статора, благодаря чему будет предотвращена неравномерность распределения тока между ветвями, особенно в случае эксцентричного расположения ротора по отношению к статору. Для соединения обмотки в две параллельные ветви рекомендуется схему составить так, чтобы одна параллельная ветвь состояла из первой и третьей групп, а вторая – из второй и четвертой. По такому же принципу можно составить и таблицу обмотки с дробным q .



3-12. Круговые схемы трехфазных двухслойных обмоток (упрощенный способ изображения схем).

Для соединения катушечных групп может быть применен и другой упрощенный способ изображения схем трехфазных двухслойных обмоток, так называемые круговые упрощенные схемы. На рис. 3-22 и 3-22 а приведена такая схема при числе полюсов $2p = 4$ с длинными и короткими перемычками. Сопряжение фаз обмотки звезда, а соединение катушечных групп в фазе – последовательное. Как видно на рисунке, схема состоит из двух частей: наружной круговой части, в которой показаны условно (отрезками окружности) все катушечные группы с обозначением к какой фазе они относятся, межкатушечные соединения, а также сопряжение фаз. Такое изображение даст возможность легко установить направление тока в каждой катушечной группе. Внутренняя часть схемы, дополняющая наружную, показывает более наглядно сопряжение фаз и соединение катушечных групп в фазе между собой, но не даст представления о межкатушечных соединениях. Таким образом внутренняя часть схемы является принципиальной, а наружная – монтажной. Во внутренней части схемы катушечные группы обозначены кружками с цифрой в середине, указывающей порядковые номера катушечных групп и последовательность их соединения между собой. На рис. 3-23 и 3-23 а приведена схема обмотки, аналогичная рассмотренной выше, но с сопряжением фаз в треугольник. На рис. 3-24 и 3-24 а и рис. 3-25 и 3-25 а приведены схемы такого же типа при $2p = 4$ с соединением катушечных групп фазы в две параллельные цепи при сопряжении фаз обмотки в звезду и в треугольник. На рис. 3-26 и 3-27 показаны упрощенные круговые схемы соединения обмоток как последовательно, так и в две параллельные цепи. В этом случае каждая фаза обмотки должна иметь три вывода, а на доску зажимов выводится девять выводов.

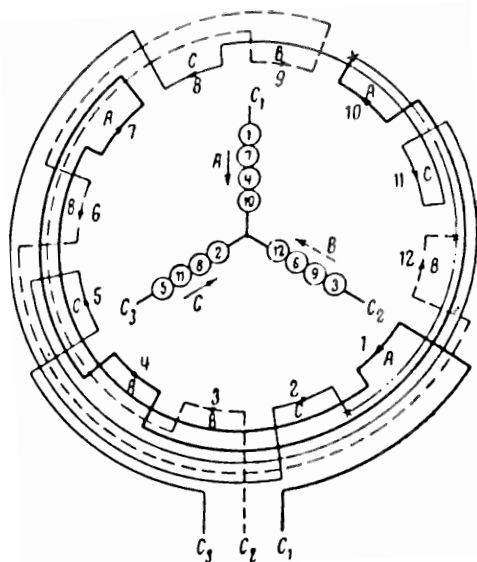


Рис. 3–22. Схема трехфазной четырехполюсной обмотки с последовательным соединением групп с длинными межгрупповыми перемычками и соединением фаз звездой.

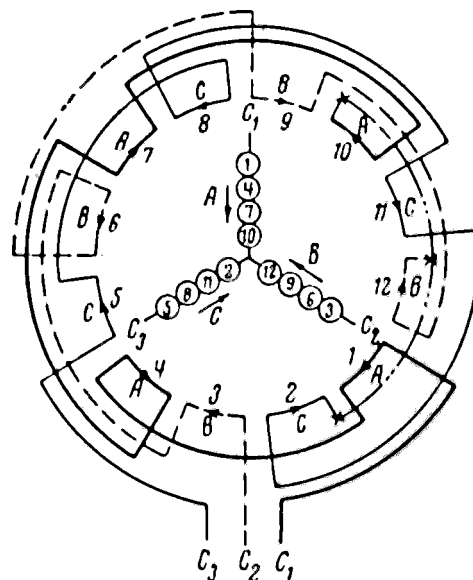


Рис 3–22 а. Схема трехфазной четырехполюсной обмотки с последовательным соединением групп с короткими межгрупповыми перемычками и соединением фаз звездой.

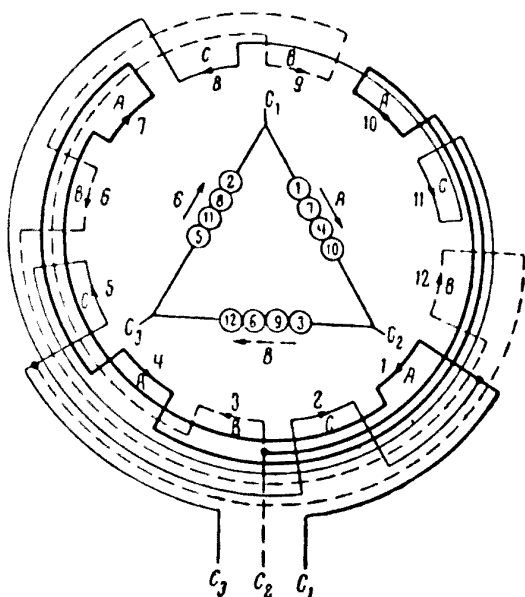


Рис. 3–23. Схема трехфазной четырехполюсной обмотки с последовательным соединением групп с длинными межгрупповыми перемычками и соединением фаз треугольником.

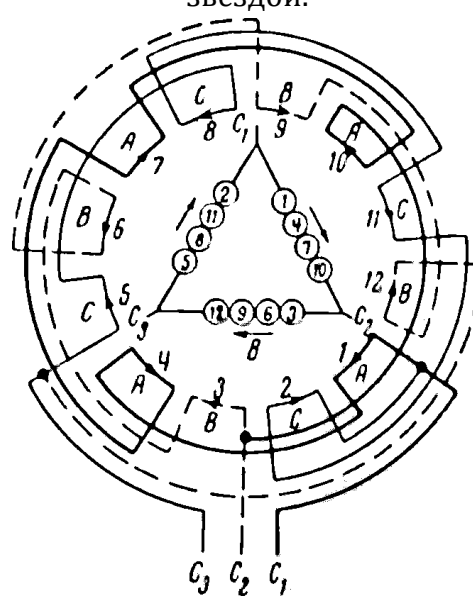


Рис. 3–23 а. Схема трехфазной четырехполюсной обмотки с последовательным соединением групп с короткими межгрупповыми перемычками и соединением фаз треугольником.

а) Пояснения к круговым схемам.

На рис. 3–22 приведена схема трехфазной обмотки с последовательным соединением катушечных групп, с длинными межгрупповыми перемычками и с соединением фаз в звезду. Каждая фаза этой схемы имеет четыре катушечные группы, где обозначены фазы, к которым этим группы относятся. Фаза А состоит из четырех катушечных групп (1, 7, 4, 10), при этом, как это видно из схемы, катушечные группы 1 и 7 расположены под полюсами одной и той же полярности и соединены последовательно, так же соединены и катушечные группы 4 и 10, расположенные под полюсами другой полярности.

В середине круга схемы приведен порядок соединения обмотки в звезду (Y) с указанием принадлежности катушечных групп к той или иной фазе, а также последовательность их соединения. Кроме того, в фазе А стрелкой показано направление тока в катушечных группах от 1 к 10, в катушечных группах фазы В – от 3 к 12, а в катушечных группах фазы С – от 5 к 2. На рис. 3-24 а приведена схема трехфазной четырехполюсной обмотки с короткими перемычками, с соединением катушечных групп в две параллельные ветви при соединении фаз в звезду. В этой схеме имеются 12 катушечных групп (по четыре в каждой фазе). Фаза А состоит из четырех катушечных групп, соединенных в две параллельные ветви (1 – 4 и 7 – 10), при этом катушечные группы 1 и 4 расположены под полюсами разной полярности, равно как катушечные группы 4 и 10.

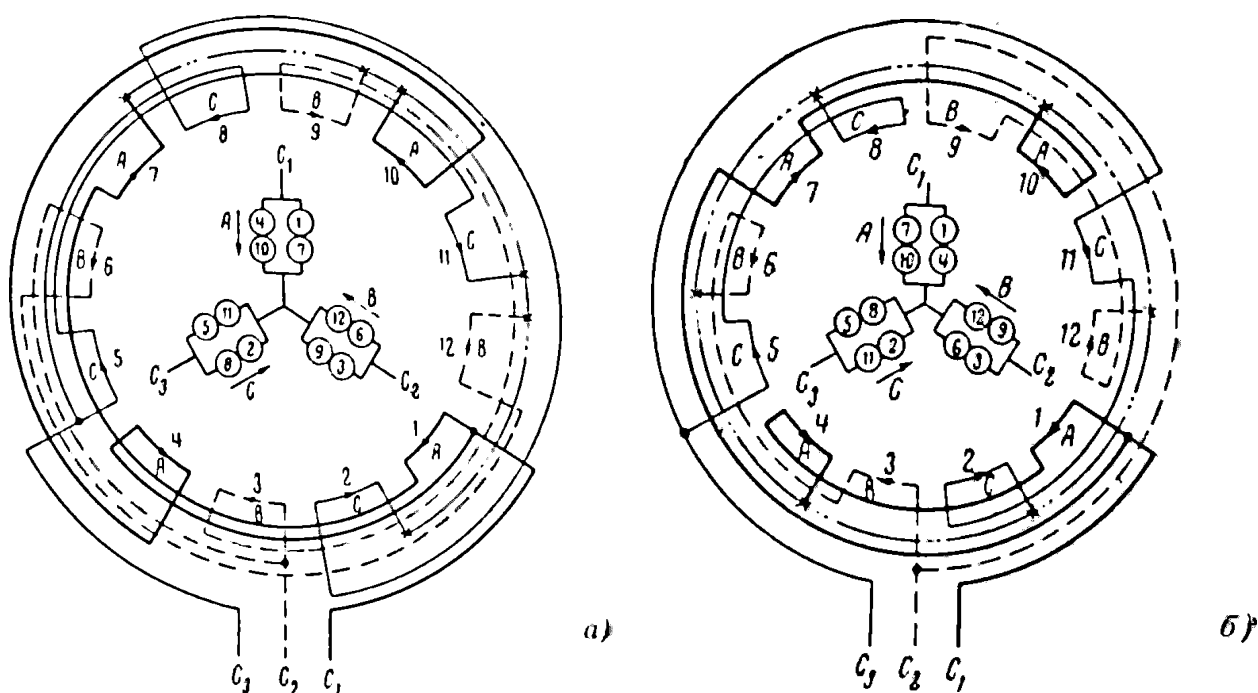


Рис. 3-24. Схема трехфазной четырехполюсной обмотки с длинными и короткими перемычками, с соединением групп в две параллельные цепи и соединением фаз звездой.

В середине круга приведена схема соединения обмоток в звезду с указанием, какие катушечные группы принадлежат к той или иной фазе, а также какие катушечные группы соединены параллельно. По этому принципу соединяются схемы обмотки с другим числом полюсов, другим числом катушечных групп в фазе, соединенных последовательно или параллельно, в звезду или треугольник. На рис. 3-26 приведена схема трехфазной четырехполюсной обмотки с длинным межкатушечным соединением и возможностью соединения катушечных групп, как в две параллельные цепи, так и последовательно. Обмотка имеет 12 катушечных групп. Фаза А состоит из четырех катушечных групп 1 – 7 – 4 – 10, которые могут быть соединены последовательно и в две параллельные ветви 1 – 7 и 4 – 10. Для такого соединения на коробку зажимов статора выводятся девять выводов.

Для соединения обмотки в две параллельные ветви выводное начало C_1 соединяется с началом $2C_1$, а конец $1C_4$ с концом катушечной группы 10 в нулевой точке звезды. Таким же методом соединяются остальные две фазы.

На рис. 3-23 приведена схема трехфазной четырехполюсной обмотки с последовательным соединением групп, с длинными межкатушечными соединениями с соединением фаз в треугольник.

Фаза А состоит из четырех катушечных групп (1 – 7 – 4 – 10), соединенных последовательно, а начало катушечной группы 1 фазы А и конец катушечной группы 3 фазы С соединены у вывода C_1 .

Таким же путем соединены конец катушечной группы 10 фазы А с началом катушечной группы 2 фазы В у вывода C_2 и начало катушечной группы 3 фазы С с концом группы 12 фазы В у вывода C_3 .

б) Порядок пользования круговыми схемами.

Известно, что каждая фаза имеет столько полюсно-фазных (катушечных) групп, сколько в электродвигателе полюсов. Катушечные группы каждой фазы могут быть соединены последовательно (рис. 3-22 и 3-23) или параллельно (рис. 3-24 и 3-25) или последовательно, а затем эти части с последовательно соединенными группами соединяются параллельно (рис. 3-26 и 3-27). Максимальное число параллельных ветвей при целом числе пазов на полюс и фазу q может быть равно числу полюсов.

Если число параллельных ветвей должно быть по расчету меньше, то число полюсов должно быть кратно требуемому числу параллельных ветвей.

Если по схеме две следующие одна за другой катушечные группы одной и той же фазы лежат под полюсами различной полярности, то ток в них протекает в различных направлениях (рис. 3-22 а).

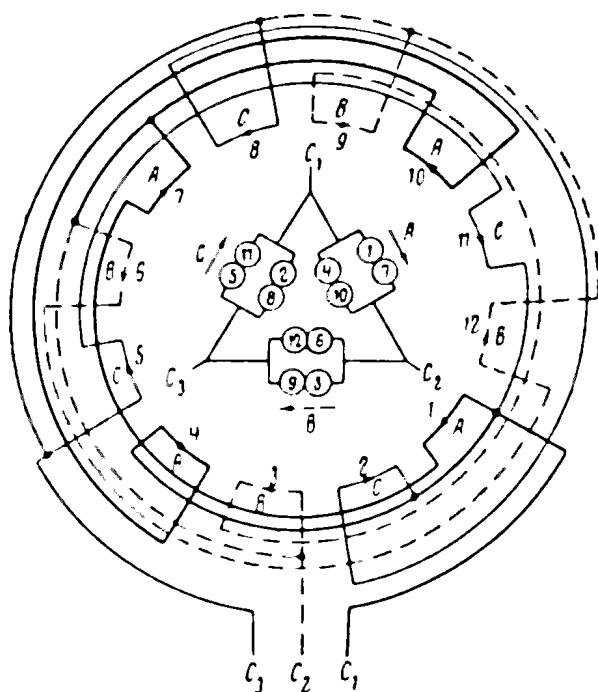


Рис. 3-25. Схема трехфазной четырехполюсной обмотки с длинными перемычками, с соединением групп в две параллельные цепи и соединением фаз треугольником.

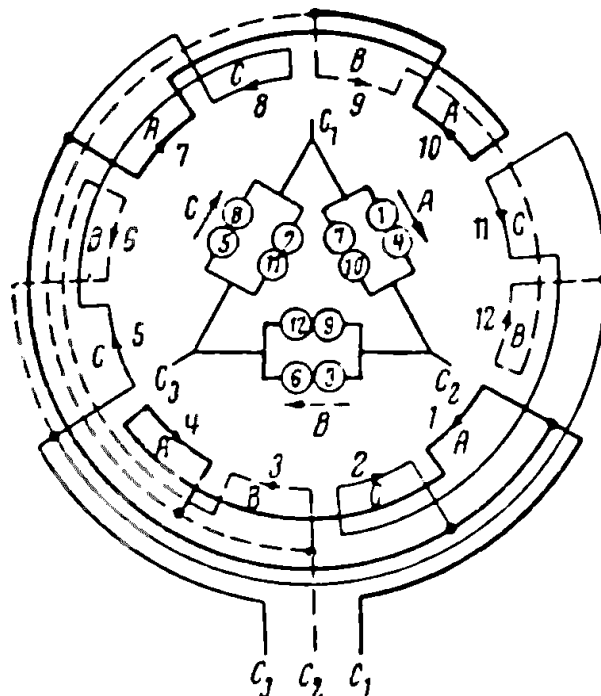


Рис. 3-25 а. Схема трехфазной четырехполюсной обмотки с короткими перемычками, с соединением групп в две параллельные цепи и с соединением фаз треугольником.

Если по схеме две катушечные группы следуют с чередованием через одну группу какой-либо фазы и лежат под полюсами одной и той же полярности, ток у них протекает в одном направлении (рис. 3-22). Направление тока в отдельных катушечных группах указывается стрелками. При последовательном соединении двух следующих друг за другом катушечных групп одной фазы конец одной катушечной группы соединяется с концом другой (рис. 3-22 а) и называется коротким соединением.

При последовательном соединении двух катушечных групп, следующих с чередованием через одну группу одной и той же фазы, конец одной катушечной группы соединяется с началом другой. Такое соединение носит название длинного соединения (рис. 3-22).

В электродвигателях с малым числом полюсов и последовательным соединением всех катушечных групп каждой фазы не будет большого различия между схемами с коротким соединением катушечных групп и схемами с длинным соединением. В небольших электродвигателях с большим числом полюсов длинные соединения имеют некоторое преимущество, так как они более технологичны при перемотках.

Параллельное соединение обмоток (рис. 3–24) способствует уменьшению не симметрии и силы одностороннего притяжения, и в этом случае обмотки с короткими соединениями катушечных групп более эффективны, чем при длинных, особенно в электродвигателях с небольшим числом полюсов.

Проверка правильности соединения обмотки, если начала обмоток фаз С1, С2 и С3, производится следующим образом: обходят отдельно каждую фазу через все ее группы и в каждой группе стрелкой отмечают направление, в котором обходят эту катушечную группу. Схему соединения следует считать правильной, если на рядом лежащих группах не получится ни одной пары соседних стрелок с одним и тем же направлением. Такая проверка основана на том, что если постоянный ток пропустить в три фазы надлежащим образом соединенной обмотки, то компас, помещенный против следующих друг за другом катушечных групп, будет показывать различные полярности.

3-13. Стержневые обмотки.

Стержневые обмотки в основном выполняются как двухслойные волновые с двумя эффективными витками в пазе, но могут выполняться и как однослойные и петлевые. Такие обмотки в основном применяются для обмоток фазных роторов, отличаясь от петлевых обмоток только тем, что при последовательном обходе обмотки по пазам вокруг ротора образуют не петли, а волны.

Существуют два способа соединения стержневых обмоток ротора.

При первом способе после каждого обхода обмотки по пазам ротора шаг последнего стержня обмотки берется равным $\tau - 1$. Такой шаг называется укороченным (см. табл. 3–16). При втором способе шаг соединения последнего стержня обмотки берется равным $\tau + 1$ и называется удлинненным.

Оба способа различаются только размером выполнения лобовых частей и их соединений. При вращении ротора его лобовые части и выводные концы также вращаются, поэтому соединения отдельных частей обмотки должны быть надежно и удобно выполнены и равномерно распределены и закреплены по окружности ротора.

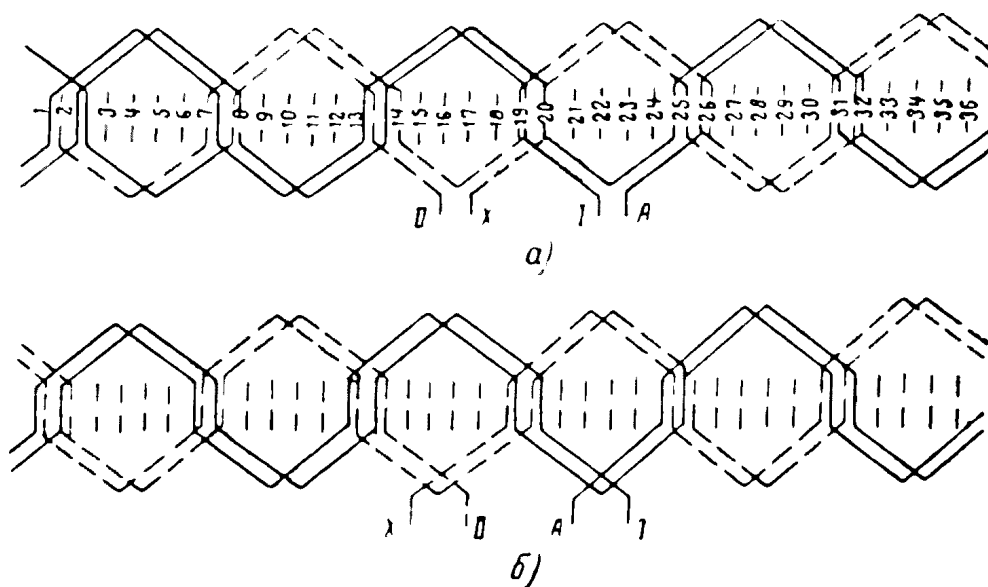


Рис. 3–28. Схема соединения стержней одной фазы волновой двухслойной обмотки, а – с укороченным шагом; б – с удлинненным шагом.

Пример. Электродвигатель с $2p = 6$, у которого ротор имеет 36 пазов ($Z = 36$), а число пазов на полюс и фазу $q = 2$. Соединение стержней (рис. 3-28, а) начинают с верхнего паза 26, который соединяется с нижним 32, так как диаметральный шаг $= y_2 = \tau = 6$, а с передней стороны нижний стержень 32 соединяется с верхним стержнем 2. Если проследить дальше по схеме (рис. 3-28, а), то стержень, который лежит в пазу 20, должен быть соединен со стержнем 26, так как он находится на расстоянии полюсного шага $\tau = 6$, чем фактически часть обмотки замкнется накоротко. Для того чтобы такого явления не было, следует стержень в пазу 20 соединить с первым стержнем следующего обхода по обмотке, т. е. с верхним стержнем, лежащим в пазу 25 с передней стороны, беря расстояние шага равным $\tau - 1$, т. е. $6 - 1 = 5$ пазовых делений от паза 20. Такая же картина получается только с удлинением шагом $\tau + 1$ (рис. 3-28, б).

Роторные обмотки выполняются как с целым, так и с дробным числом пазов на полюс и фазу (дробное q). При дробном q знаменатель дроби q обычно бывает равен двум. При обходе волновой обмотки вокруг ротора одна волна обмотки направляется по часовой стрелке, а другая против, поэтому после обхода волн (по и против часовой стрелке) получаются четыре конца, из которых два относятся к одной волне, а два к другой, где любой из четырех концов может быть принят за начало фазы (рис. 3-28, а). Обычно за начало фазы при соединении обмоток принимают правый верхний стержень фазной зоны (фазная зона равна q).

Как видно из рис. 3-28, а, за начало фазы принят верхний стержень паза 26, а так как соседние фазные зоны одной и той же фазы смещены на полюсное деление τ , то началами следует считать выводы А и II, а концами – выводы X и I.

Если число параллельных ветвей $a = 1$, то вывод I следует соединить с выводом II через перемычку, и когда началом фазы будет А, а концом X; если $a = 2$, то вывод А следует соединить с выводом II, а вывод X с выводом I (рис. 3-29).

Разность между номерами пазов, в которых расположены стержни выводов А и I, равна $4q_2 - 1$, этой же величине разности и равна разность между номерами пазов, где расположены стержни выводов X и II.

Разность между стержнями выводов I и II равна $3q_2$, так как эти лапы отстают на τ . Такое же расстояние будет и между стержнями выводов I и II.

Таким образом, если паз, где расположен стержень с выводом А, обозначить буквой К а нумерацию пазов вести от первого паза вправо, учитывая при этом, что совершенно безразлично, какой из пазов принят под номером 1, можно составить таблицу номеров пазов, где будут расположены выводные стержни фазы I (см. табл. 3-12).

Остальные две фазы выполняются аналогично первой фазе.

Таблица 3-12.

А	X	I	II
К	К - $3q_2$	К - $(4q_2 - 1)$	К - $(7q_2 + 1)$
К = 1	Z + 1 - $3q_2$	Z + 2 - $4q_2$	Z + 2 - $7q_2$

Расположение начальных стержней фаз II и III будет в трех равноотстоящих точках окружности ротора. По схеме, приведенной на рис. 3-30, где $2p = 4$, $Z_2 = 36$ и $q_2 = 3$, начало В второй фазы и начало С третьей фазы должны отстоять друг от друга на $\frac{1}{3}$ окружности, т. е. на $Z/3 = 36/3 = 12$ пазов, почему и стержень В должен быть уложен в паз 13, а стержень С в паз 25. В табл. 3-13 даны номера выводных стержней.

Таблица 3-13.

А	В	С	X	Y	Z	I	III	V	II	IV	VI
1	13	25	28	4	16	26	2	14	17	29	5

При производстве обмоточных работ удобнее чтобы стержень С находился в последнем пазу, т. е. в 36-м, и тогда стержень А должен быть сдвинут на 11 пазов ($36 - 25$) и попадает в паз 12 ($11 + 1$) вместо паза 1, стержень В – соответственно в паз 24 ($13 + 11$) вместо паза 13, а стержень С – в паз 36 ($25 + 11$) вместо паза 25.

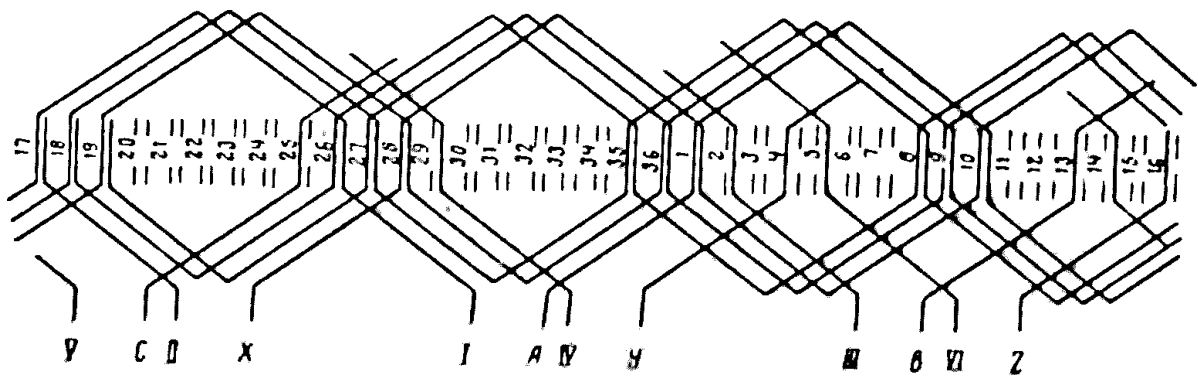


Рис. 3–30. Схема соединения стержней одной фазы обмотки ротора $2p = 4$, $m = 3$, $q_2 = 3$

Для того чтобы в электрическом отношении обмотка получалась симметричной, необходимо начала всех фаз сдвинуть между собой на 120 эл. град (вся окружность ротора имеет $p \times 360$ эл. град). Если число пар полюсов p электродвигателя делится на 3, то расположить выводные концы фаз симметрично на расстояние $\frac{1}{3}$ окружности ротора не удастся, поэтому выводные концы фаз II и III следует расположить с таким расчетом, чтобы между началами фаз A, B, C было по 120 или 240 эл. град, плюс любое целое число раз по 360 эл. град.

Для осуществления такой схемы вначале следует нарисовать схему расположения фазных зон с указанием на ней "начало" и "конец", а стержни A, B, C расположить в фазных зонах I, II, III и в зависимости от стержней A, B, C расположить остальные выводные стержни.

Пример. Если электродвигатель имеет $2p = 6$, $m = 3$, $Z_2 = 72$, $q_2 = 4$, то номера выводных концов обмотки можно расположить в соответствии с данными табл. 3–14. Из этой таблицы видно, что между стержнями A – B, X – V, I – III, II – IV находится по 16 пазов, что равно четырем фазным зонам ($q = 4$). а так как ширина фазной зоны равна 60 эл. град, все выводные стержни фаз I и II будут находиться на расстоянии $60 \times 4 = 240$ эл. град друг от друга.

Таблица 3–14.

A	B	C	X	Y	Z	I	III	V	II	IV	VI
16	32	72	4	20	60	1	17	57	61	5	45

Между концами фаз II и III находятся по 40 пазов или $40/4 = 10$ фазных зон или $60 \times 10 = 600$ эл. град, или $600 - 360 = 240$ эл. град. и таким образом, все три фазы расположены под углом в 120 и 240 эл. град. Образование параллельных ветвей стержневых обмоток осуществляется так же, как и при петлевых обмотках.

Пример. Электродвигатель, у которого $2p = 4$, $m = 3$, $q_2 = 3$, $Z_2 = 36$, требуется определить номера выводных стержней фазы I, если за начало фазы A примем паз 1.

A = 1 начало

$$X = Z_2 + 1 - 3q_2 = 36 + 1 - 3 \times 3 = 37 - 9 = 28$$

$$I = Z_2 + 2 - 4q_2 = 36 + 2 - 4 \times 3 = 38 - 12 = 26$$

$$II = Z_2 + 2 - 7q_2 = 36 + 2 - 7 \times 3 = 38 - 21 = 17$$

$$B = 36/3 + 1 = 12 + 1 = 13$$

$$Y = Z_2 + 13 - 3q_2 = 36 + 13 - 9 = 49 - 36 = 13$$

$$V = Z_2 + 2 \times 13 - 4q_2 = 36 + 26 - 12 = 50 - 36 = 14$$

$$VI = Z_2 + 2 \times 13 - 7q_2 = 36 + 26 - 21 = 62 - 21 = 41 - 36 = 5$$

$$C = 13 + 12 = 25$$

$$Z = 36 + 1 \times 25 - 3q_2 = 36 + 25 - 9 = 61 - 9 = 52 - 36 = 16$$

$$III = 36 + 2 \times 25 - 4q_2 = 36 + 50 - 12 = 86 - 12 = 74 - 36 = 38 - 36 = 2$$

$$IV = 36 + 2 \times 25 - 7q_2 = 36 + 50 - 21 = 86 - 21 = 65 - 36 = 29$$

На базе этих данных и составлена табл. 3–13.

Если, как это было указано, с точки зрения удобства начало третьей фазы С расположить в пазу 36, т. е. сдвинуть его на $36 - 25 = 11$ пазов, то необходимо соответственно и остальные начала фаз сдвинуть, и тогда А попадет в паз $1 + 11 = 12$, В – в паз $13 + 11 = 24$, а С – в паз $24 + 12 = 36$ и таблица будет выглядеть следующим образом (см. табл. 3–15).

Таблица 3–15.

А	В	С	X	Y	Z	I	III	V	II	IV	VI
12	24	36	3	15	27	1	13	25	28	4	16

3–14. Составление схем роторных обмоток с целым q .

а) Волновые стержневые обмотки с целым q .

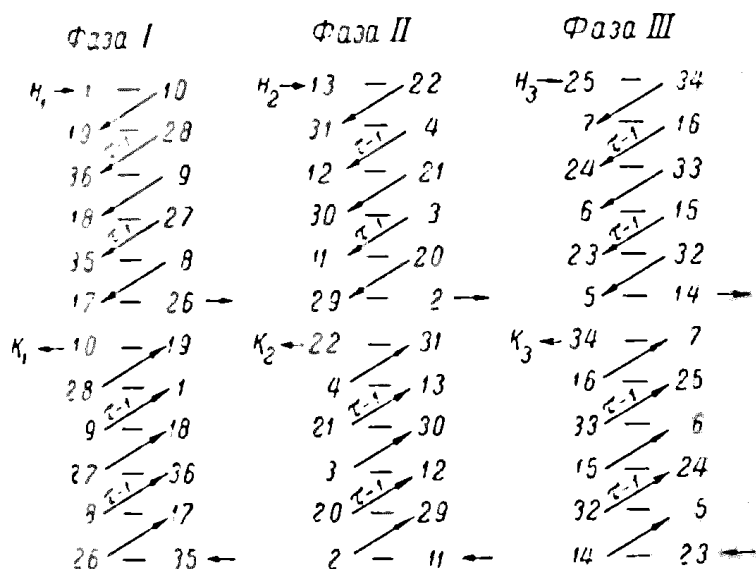
Для составления схемы роторной обмотки у которой $2p = 4$, $Z_2 = 36$, $y_2 = 9$, $q_2 = 3$ (рис 3–следует из паз 1 пойти в паз 10 ($1 + 9$), затем 19, 28 и т. д. Последний шаг обхода должен быть равен $\tau - 1$ (укороченный), на единицу меньше нормального шага, тогда стержень придет в верх паза 36, откуда начнется второй обход, пока число обходов не достигнет величины q , чем намотка первой половины фазы 1 будет закончена. Таким же образом после определения начал наматывают и обмотку других фаз.

Для всех чисел пар полюсов, не кратных трем, начала фаз можно разместить под углом 120° . В приведенном примере (рис. 3–30) начало второй фазы определится как $Z_2/3 + 1 = 36/3 + 1 = 13$, а начало третьей фазы как $2 \times Z_2/3 + 1 = 72/3 + 1 = 25$.

Порядок соединения схемы, не прибегая к ее вычерчиванию, можно произвести по табл. 3–16. При определении начал фаз надо стремиться по возможности разместить их дальше друг от друга, особенно в небольших быстроходных электродвигателях.

Таблица 3–16.

Порядок соединения стержней без вычерчивания схемы



Так как обход второй половины фазы должен следовать в обратную сторону, то ее конец должен быть расположен аналогично началу первой половины и выходить из верха паза, где номер паза будет отличаться от номера паза начала первой половины на $3q_2$, т. е. на 9 пазов. Вторую половину обмотки можно наматывать в сторону убывания номеров пазов (что удобнее при намотке) или их возрастания.

В данном случае перемычка (переход) первой фазы получится от паза $26 + 9 = 35$, т. е. низ паза 26 должен быть соединен с низом паза 35, у второй фазы – низ паза 2 с низом паза 11, а у третьей фазы – низ паза 14 с низом паза 23.

Если число полюсов кратно трем, то равномерно распределить начала и концы фаз по окружности ротора нельзя, ибо под углом 120° всегда будут находиться пазы одной и той же фазы. В таких случаях рекомендуется их разбросать по окружности ротора дальше друг от друга, учитывая при этом, что это может дать некоторую неуравновешенность в балансе ротора.

б) Волновые стержневые обмотки роторов с дробным q .

При дробном числе (пазов на полюс и фазу нормальный шаг обмотки не может точно равняться полюсному делению τ . Обычно роторные обмотки бывают со знаменателем дроби q_2 равным 2. Шаг такой обмотки может быть только целым числом, поэтому в данных случаях он не может быть диаметральной, а только укороченным или удлинненным. Так как каждая пара соседних шагов в сумме должна равняться величине двойного полюсного деления $2 \times \tau$, то укороченный или удлинненный шаги волнообразной обмотки ротора должны чередоваться.

Обычно разность между укороченным и удлинненным шагами равна единице, но может быть равна любому числу. Число стержней каждой зоны при дробном числе пазов на полюс и фазу чередуются в каждом слое обмотки. Вся ветвь обмотки, которая начинается фазной зоной с $q - \frac{1}{2}$ стержней, имеет по $q - \frac{1}{2}$ стержней во всех своих фазных зонах, а другая ветвь этой же зоны должна состоять из фазных зон по $q + \frac{1}{2}$ стержней. Вторая ветвь включает в себе все нижние стержни тех пазов, где первая ветвь включает верхние, и наоборот. Если через β обозначить шаг обмотки со стороны выводов, а через β_1 – шаг обмотки со стороны, противоположной выводам (рис. 3-31). то шаг в конце обхода (нормальный шаг) будет равен:

$$\beta_2 = \beta_1 - 1$$

Если шаг обмотки со стороны выводов на единицу меньше шага противоположной стороны (рис. 3-32), т. е. $\beta = \beta_1 - 1$, то шаг $\beta_2 = \beta_1 - 1 = \beta$. Если же шаг обмотки со стороны выводов на единицу больше шага противоположной стороны (рис. 3-31 и 3-32), то $\beta_2 = \beta - 2$.

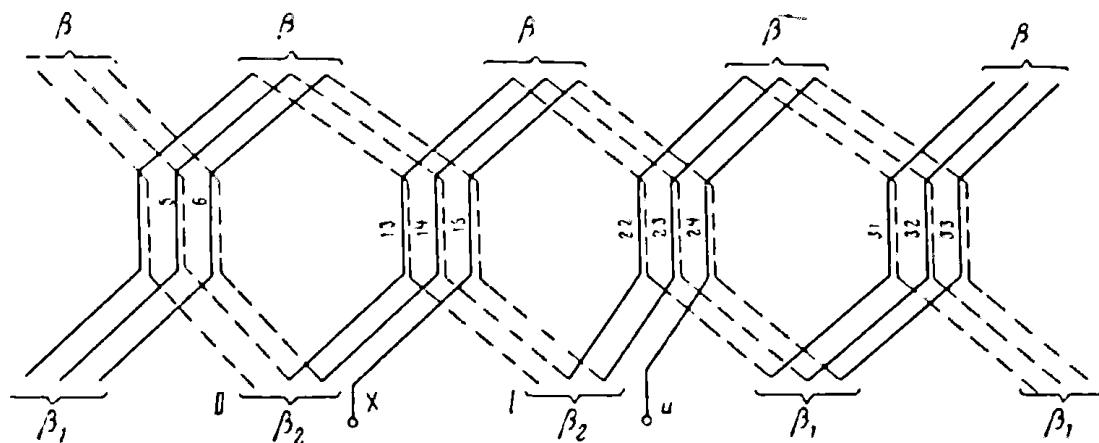


Рис. 3-31. $2p = 8, Z = 72, q = 3$.
Шаг нормальный $\beta = \beta_1 = 9$, шаг не нормальный $\beta_2 = 8$.

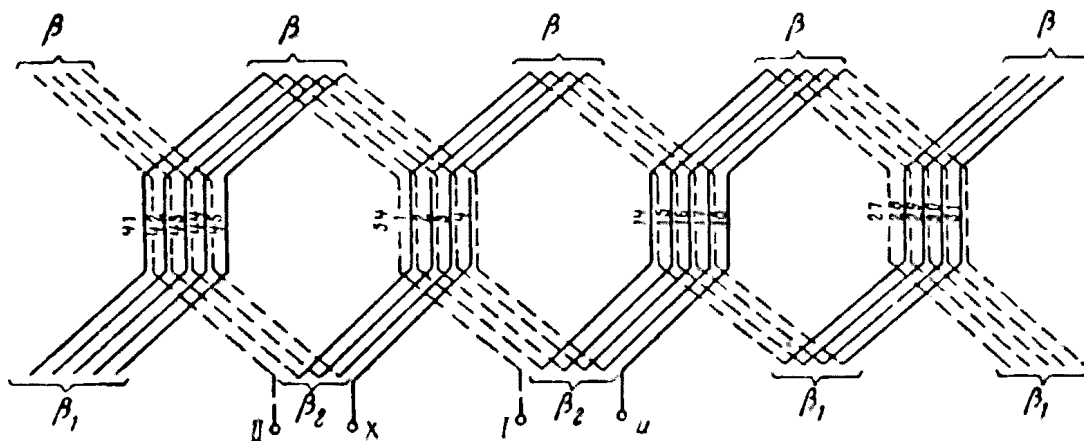


Рис. 3-32. $2p = 4$, $Z = 54$, $q = 4,5$.
Шаг нормальный $\beta_1 = 14$, $\beta = 13$, шаг не нормальный $\beta_2 = 13$.

3-15. Многоскоростные трехфазные обмотки.

Многоскоростные обмотки применяются в тех случаях, когда возникает необходимость в регулировании скорости трехфазных асинхронных электродвигателей посредством изменения числа полюсов обмотки. Различают двух-, трех- и четырехскоростные электродвигатели. Для многоскоростных электродвигателей применяются либо две электрические, не связанные между собой обмотки, где каждая рассчитана на одно число полюсов, либо одна обмотка, которая может быть переключена при помощи специального переключателя на два различных числа полюсов. Обмотки с переключением чаще всего применяются для отношения скоростей 1 : 2. Для трехскоростных электродвигателей применяются две обмотки статора, где одна обмотка на определенное число полюсов и вторая, допускающая переключение полюсов в отношении 1 : 2. Для четырехскоростных электродвигателей обычно применяются две отдельные обмотки, каждая из которых допускает переключение числа полюсов в отношении 1 : 2. Реже применяется одна обмотка с переключением числа полюсов на три или четыре скорости. При этом в большинстве случаев предел регулирования не превышает 1 : 4.

В многоскоростных электродвигателях ротор выполняется обычно короткозамкнутым. Применение ротора с фазной обмоткой (с контактными кольцами) потребовало бы переключения числа полюсов также и в обмотке ротора, что при переключении внесло бы серьезные осложнения.

Переключение или перемотка односкоростных электродвигателей на двухскоростные в основном затрагивает только статорную обмотку.

При производстве расчета обмоток в основном принимаются данные односкоростного электродвигателя, а сам расчет производится по обычному методу, как для односкоростного.

Если низшая скорость электродвигателя совпадает со скоростью переделываемого электродвигателя, например электродвигатель со скоростью вращения 1000 об. мин. пересоединяется или перематывается на 1000/1500 об. мин. и т. п., то при расчете можно оставить первоначальную плотность тока и индукцию и воздушном зазоре, если при высшей скорости индукция в спинке статора не выйдет за пределы допустимых величин. Для сохранения направления вращения при переключении числа полюсов на высшую скорость следует соответственно переключить и фазы питающей сети.

Для двухскоростных электродвигателей с соотношением скоростей 2 : 1 или полюсов 1 : 2 практически для соединения фаз пользуются схемами треугольник – две звезды (Δ/Y_Y), две звезды – треугольник (Y_Y/Δ), звезда – две звезды (Y/Y_Y) и две звезды – звезда (Y_Y/Y), при которых переключение полюсов совершается с минимальным числом выводов от обмотки (шесть выводов).

При переключении числа полюсов с отношением 2 : 1 при работе электродвигателя на постоянную мощность ($P = \text{const}$) в основном применяются схемы треугольник – две звезды (Δ/YY) и две звезды – треугольник (YY/Δ), а в режиме постоянства момента – по схеме звезда – две звезды (Y/YY).

а) Метод переключения обмоток статоров на число оборотов с отношением 1 : 2.

В асинхронных электродвигателях число полюсов и их расположение определяются электрической схемой обмотки статора.

Если электродвигатель имеет одну обмотку в статоре, изменение числа полюсов или изменение скорости его вращения можно получить путем изменения направления тока в части обмотки, т. е. путем пересоединения обмотки.

Практически наибольшее распространение имеют обмотки с переключением только на два числа полюсов, обычно находящихся в отношении 1 : 2.

Для пояснения принципа переключения статорной обмотки на различное число полюсов приведена схема на рис. 3–33 а, где показаны две катушки 1 и 2, соединенные последовательно. Крестиками и точками в кружках показано направление тока в сторонах катушек для какого-то определенного момента вращения.

При таком соединении катушек магнитный поток, возбуждаемый катушками, образует четыре полюса. Если теперь катушки 1 и 2 соединить параллельно (рис. 3–33, б), то образуются только два полюса.

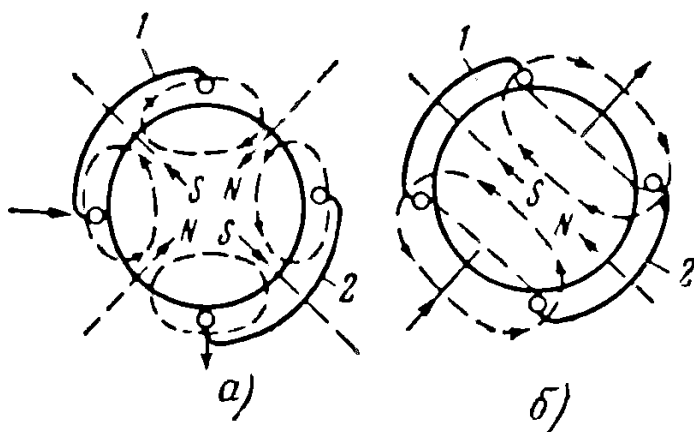


Рис. 3–33. Распределение магнитного поля.
а – при $p = 2$; б – при $p = 1$.

Переключение обмотки на две скорости возможно не только переключением двух частей каждой фазы с последовательного соединения на параллельное, но путем соответствующего переключения этих двух частей обмотки при сохранении последовательного их соединения. На рис. 3–34 а приведена схема одной фазы статорной обмотки для переключения на четыре и восемь полюсов.

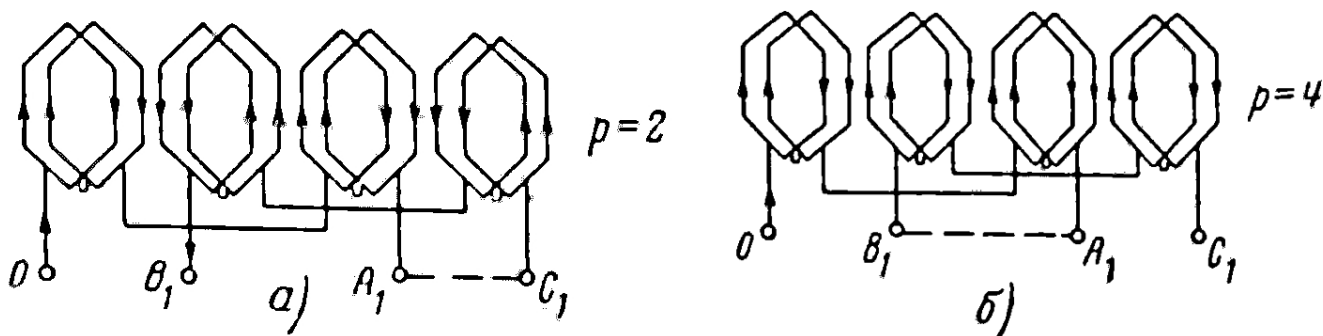


Рис. 3–34 Схема переключения одной фазы статорной обмотки на четыре и восемь полюсов.

Обмотка состоит из двух частей, в одной – части первая и третья катушечные группы, а во второй – вторая и четвертая, при этом конец первой катушечной группы соединяется с началом третьей, а конец второй – с началом четвертой группы.

Для переключения обмотки фазы на четыре полюса соединяют конец A_1 с концом C_1 , конец 0 соединяется с нулевой точкой звезды, конец B_1 – к выходу.

Для переключения обмотки на восемь полюсов концы A_1 соединяются с концом B_1 , конец 0 – на соединение в звезду, а конец C_1 – на выход.

По направлению токов (стрелки на катушках), видно, что обмотка рис. 3–34 а имеет четыре полюса, а обмотка рис. 3–35 б восемь полюсов.

На рис. 3–35 приведена одна фаза двухслойной четырехполюсной обмотки с диаметральным шагом, где число катушечных групп в ней равно числу полюсов, т. е. четырем. Катушечные группы обходятся от начала фазы к ее концу поочередно в противоположных направлениях, что не дает возможности разделить фазу на две половины для того, чтобы изменением направления обхода в одной из них изменить число полюсов.

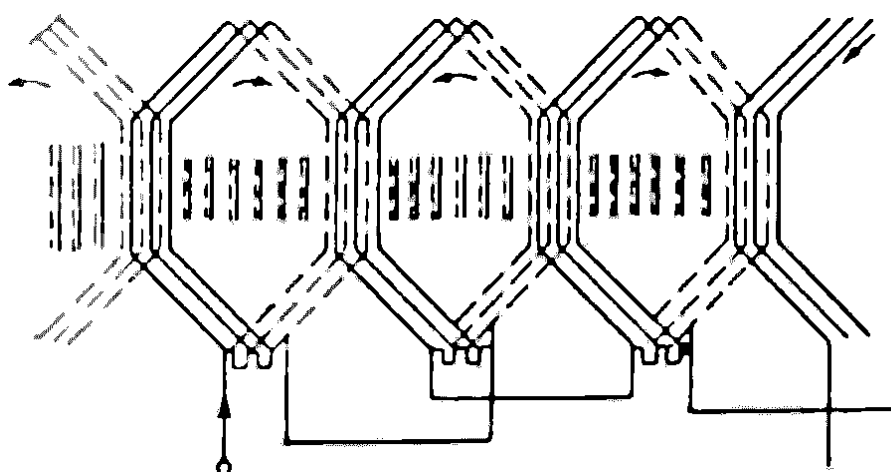


Рис. 3–35. Одна фаза двухслойной обмотки четырехполюсного электродвигателя с диаметральным шагом.

На рис. 3–36 а приведена обмотка также с диаметральным шагом, но число катушечных групп в ней равно большему числу пар полюсов и может быть без затруднения переключена на половинное число пар полюсов (рис. 3–36 б).

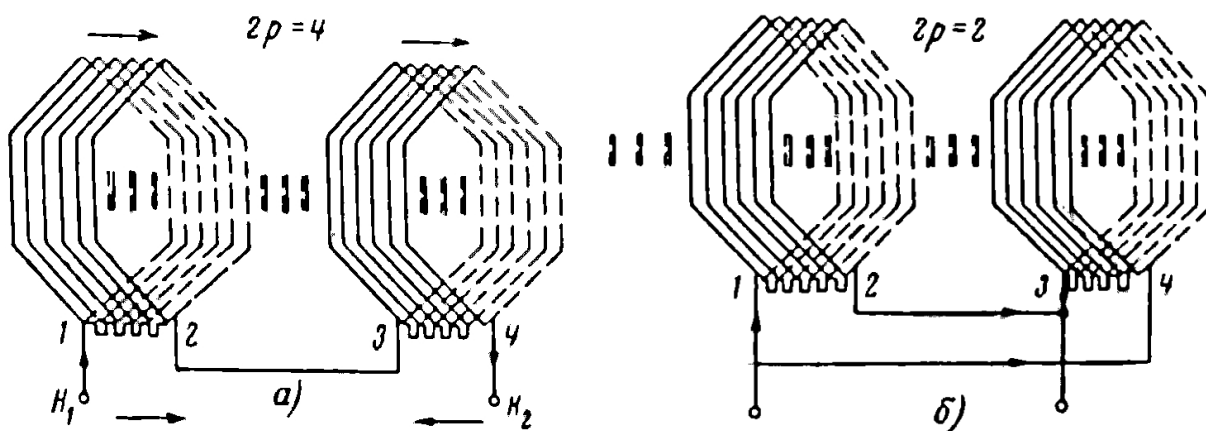


Рис. 3–36. Одна фаза двухслойной обмотки с переключением числа полюсов.

На рис. 3–37 приведена схема для переключения обмоток, имеющая шесть выводов. При большем числе полюсов фазы соединены наглухо в звезду (рис. 3–37 а), а изменение числа полюсов достигается переносом питания обмотки из концов фаз (точки 4, 8 и 12)

и середину фазы (точка 2 – 3, 6 – 7, 10 – 11) с одновременным замыканием освободившихся концов друг с другом, благодаря чему образуется вторая нулевая точка. При таком соединении при меньшем числе полюсов обмотка оказывается соединенной в звезду с двумя параллельными ветвями (рис. 3–37 б).

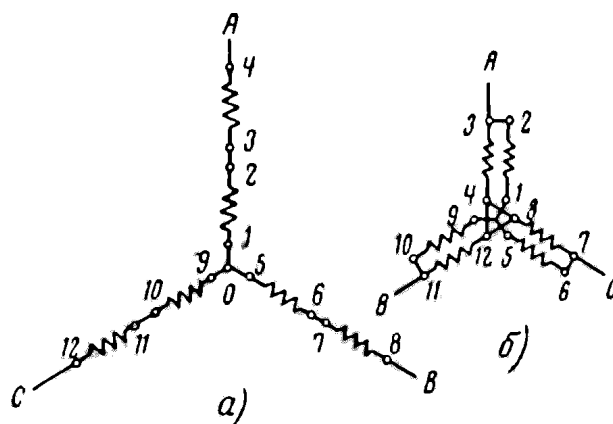


Рис 3–37. Схема переключения двухскоростной обмотки, а – большее число полюсов – "звезда"; б – меньшее число полюсов, "звезда" с двумя параллельными ветвями.

Для переключения соединенных в треугольник фазных обмоток с большего числа полюсов (рис. 3–38) на меньшее питание обмотки с вершин треугольника (точки 1 – 12, 4 – 5 и 8 – 9) (рис. 3–38 а) переносится в середину сторон треугольника (точки 2 – 3, 6 – 7, 10 – 11) с замыканием концов вершин треугольника друг с другом в общую нулевую точку, где обмотка оказывается соединенной в звезду с двумя (параллельными ветвями (рис. 3–38 б). В этих обоих случаях (рис. 3–37 и 3–38) при сохранении порядка чередования фаз питания направление вращения с изменением числа полюсов изменяется на обратное. Для сохранения направления вращения электродвигателя следует одновременно с переключением изменить и порядок чередования фаз.

Кроме рассмотренных схем, применяются и другие, в том числе и схема треугольник – двойная параллельная звезда, где для большего числа полюсов обмотки соединяются треугольником, а для меньшего числа полюсов – по схеме двойная звезда.

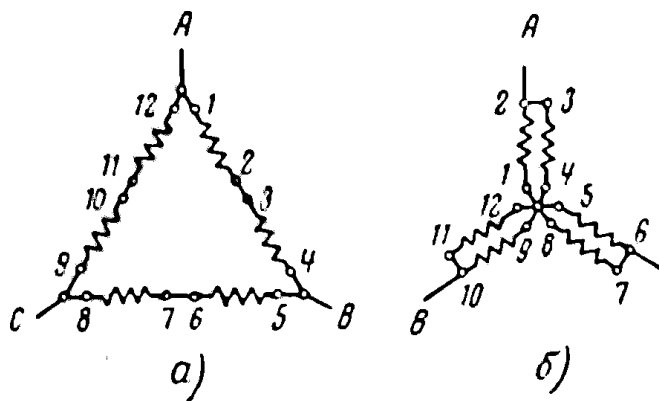


Рис. 3–38. Схема переключения двухскоростной обмотки, а – большее число полюсов – "треугольник"; б – меньшее число полюсов – "звезда" в две параллельные ветви.

б) Круговые схемы двухскоростных электродвигателей.

Если желательно иметь две скорости при их отношении 2 : 1, то и число полюсов должно находиться в отношении 1 : 2. Если, предположим, требуются скорости 1500 и 750 об. мин. или 1000 и 500 об. мин., то обмотка должна создавать число полюсов, равное 1 – 8, 6 – 12, которое можно получить при одной обмотке путем ее переключения.

Удвоенное число полюсов получается при изменении направления тока в одной из двух частей каждой фазы путем переключения частей. Полюсное деление будет равно половине полюсного деления обмотки с меньшим числом полюсов. Так как катушечная группа занимает $\frac{1}{3}$ полюсного деления обмотки на высшую скорость, то при обмотке на низшую скорость она будет занимать $\frac{2}{3}$ полюсного деления.

На рис. 3-39 приведена схема соединения этой обмотки в звезду при двух параллельных ветвях, при этом получается шесть полюсов, так как соединение будет обычным для шестиполюсной обмотки.

В фазе А ток в катушечных группах 1, 7 и 13, а также 16, 10 и 4 имеет направление соответственно от 1 к 7, от 7 к 13, от 16 к 10, а от 10 к 4.

Для работы электродвигателя при скорости равной 1000 об. мин. и постоянном вращающем моменте (рис. 3-39) к питающей сети подключаются выводы 12C₁, 12C₂ и 12C₃, а выводы 6C₁, 6C₂ и 6C₃ соединяются. Для работы электродвигателя при скорости 500 об. мин. при постоянном вращающем моменте (рис. 3-39) к питающей сети подключаются выводы 6C₁, 6C₂ и 6C₃, а выводы 12C₁, 12C₂, 12C₃ остаются разомкнутыми. При скорости 500 об. мин. к сети подключаются выводы 6C₁, 6C₂ и 6C₃.

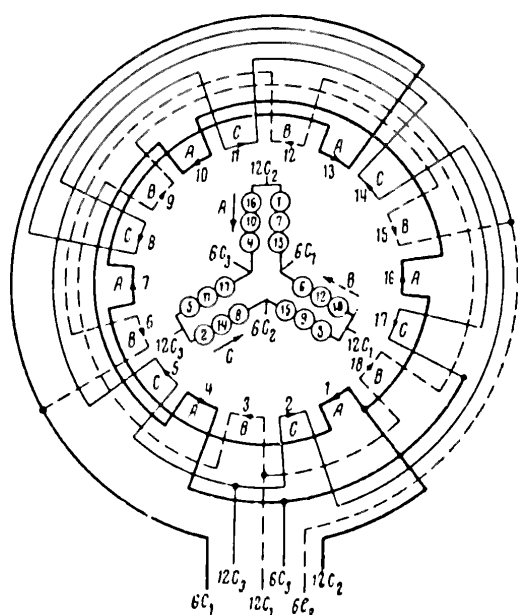


Рис. 3-39. Схема соединения трехфазной двухскоростной обмотки на 6 и 12 полюсов для работы с не изменным вращающим моментом.

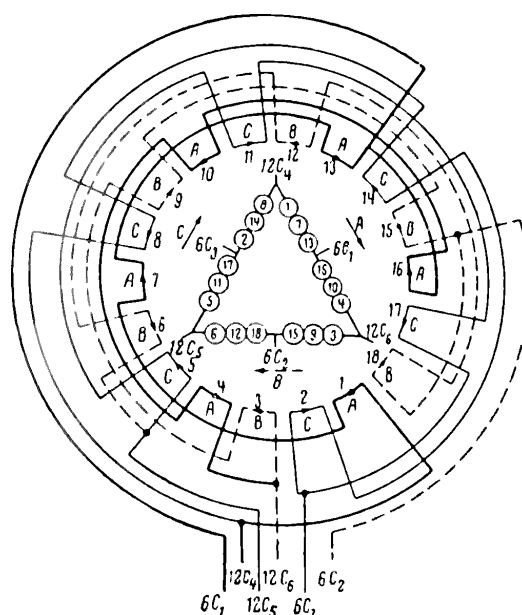


Рис. 3-40. Схема соединения трехфазной двухскоростной обмотки на 6 и 12 полюсов для работы с не изменной мощностью.

3-16. Однофазные обмотки переменного тока.

Однофазная обмотка в отличие от трехфазной имеет фазные зоны в 2 раза шире (120 эл. град.) под каждым полюсом, а в отношении схемы однофазные обмотки ничем не отличаются от трехфазных и практически выполняются либо в виде катушечной концентрической, либо в виде двухслойной петлевой обмотки.

а) Катушечная концентрическая обмотка.

Как и в трехфазной обмотке, катушки соединяются последовательно в катушечные группы. Число катушек в каждой катушечной группе составляет:

$$q = \frac{2 \times Z}{2p \times 3} = \frac{Z}{p \times 3}$$

Например, для обмотки у которой $2p = 4$ и $Z = 36$, число пазов на полюс и фазу составит.

$$q = \frac{Z}{p \times 3} = \frac{36}{2 \times 3} = 6$$

Число катушечных групп, как и всегда при катушечной концентрической обмотке, равно числу пар полюсов p . Все катушечные группы в этом случае имеют одинаковую форму, и лобовые части их лежат в одной плоскости.

б) Статорная обмотка однофазного электродвигателя занимает $\frac{2}{3}$ общего числа пазов. Остальная часть пазов обычно занимается так называемой пусковой обмоткой. Отсутствие начального пускового момента у однофазного электродвигателя объясняется тем, что поле, образуемое однофазной обмоткой, не вращающееся, а пульсирующее, т. е. направление этого поля неизменно по отношению к статору, а величина его все время меняется, пульсируя с частотой сети по синусоидальному закону, взаимодействие пульсирующего поля статора с током в проводниках ротора не может создать вращающего момента.

Если вращать ротор какой-либо внешней силой в каком-либо направлении, то одно вращающееся поле будет вращаться в том же направлении, что и ротор, и это поле будет называться прямо вращающимся, а другое поле – обратно вращающимся.

По мере увеличения оборотов ротора действие прямо вращающегося поля будет возрастать, а обратно вращающегося – убывать – ослабевать и электродвигатель сможет развивать вращающий момент.

в) Вращающееся поле может быть получено, если через две обмотки, сдвинутые в пространстве друг относительно друга на 90° эл. град., пропустить токи, сдвинутые по фазе на 90° эл. град. Для этой цели в статоре, кроме основной (рабочей) обмотки, помещается еще пусковая. Для сдвига тока по фазе на 90° последовательно с пусковой обмоткой включается конденсатор (емкость). По такой схеме электродвигатель может работать с постоянно включенной пусковой обмоткой и конденсатором (рис. 3-41). Емкость конденсатора определяется по формуле:

$$C_p = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{I_n \times 10^4}{\omega \times U} \text{ мкФ}$$

где $\omega = 314,1/\text{мин.}$ ($\omega = 2 \times \pi \times f = 314,1$ для 50 гц), I_n – ток номинальный, U – напряжение однофазной сети.

Для пуска однофазного электродвигателя последовательно с пусковой обмоткой вместо емкости может быть включено и активное сопротивление, которое отключается от сети после того, как скорость электродвигателя будет приближаться к номинальной.

Величина активного сопротивления должна равняться величине сопротивления пусковой обмотки переменному току и может быть приблизительно определена по формуле:

$$R = \frac{a \times \eta_n \times \cos \varphi_n}{K_i \times P_n}$$

где a – коэффициент, зависящий от характеристики электродвигателя, η_n и $\cos \varphi_n$ номинальные кпд и коэффициент мощности в трехфазном исполнении, K_i – кратность пускового тока электродвигателя, P_n – номинальная мощность в трехфазном исполнении.